

TERO SAVOLAINEN

Pysäyttävä raiteensulku - kehitys ja käyttöönotto



Tero Savolainen

Pysäyttävä raiteensulku – kehitys ja käyttöönotto

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 39/2013

Liikennevirasto
Helsinki 2013

Kannen kuva: VR Track Oy

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-304-1

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Tero Savolainen: Pysäyttävä raiteensulku – Kehitys ja käyttöönotto. Liikennevirasto, infra- ja ympäristöosasto. Helsinki 2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 39/2013. 87 sivua ja 4 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-304-1.

Avainsanat: pysäyttävä raiteensulku, turvalaite, tuotekehitys, käyttöönotto, rautatie, juna

Tiivistelmä

Pysäyttävä raiteensulku on uusi ratatekninen turvalaite, jonka avulla vapaasti vierivät vaunut saadaan hallitusti pysäytettyä liukukitkan avulla. Työn alussa on esitetty yhteenveto vuonna 2005 alkaneesta tuotekehitysprojektista. Yhteenvedon jälkeen on tarkasteltu pysäyttävän raiteensulun teoreettista toimintaa, tuotekehitysmahdollisuuksia ja tarpeellisia jatkotutkimuksia sekä laitteen elinkaaren aikaiseen käyttöön liittyviä asioita.

Pysäyttävän raiteensulun tuotekehityksen yhteenveto on esitetty kronologisessa järjestyksessä tarkastellen tuotekehitysvaiheissa käytettyjä menetelmiä, koelaitteistoja ja saatuja tuloksia. Tämän jälkeen työssä on tarkasteltu teoreettisesti liikkuvan kaluston vapaata vierimistä ja kaluston pysäyttämistä pysäyttävällä raiteensululla. Teoreettisten tarkastelujen ja pysäytyskokeiden tulosten perusteella on kehitetty laskentamalli, joka kuvaa pysäyttävän raiteensulun pysäytysmatkaa. Työssä on esitetty uusia tuotekehitysmahdollisuuksia, joiden avulla voidaan alentaa valmistuskustannuksia ja/tai laajentaa mahdollisia käyttökohteita. Käyttöönotto-osiossa on tarkasteltu pysäyttävän raiteensulun mahdollisia käyttökohteita sekä laitteen sijoittamista, ohjausta ja kunnossapitoa.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että pysäyttävää raiteensulkua voidaan käyttää pysäyttämään vaunu edellä vapaasti vierivää liikkuvaa kalustoa. Turvalliseen käyttöön liittyvät sijoittamista rajoittavat tekijät on huomioitava laitteen käytön suunnittelussa. Suoritetuissa pysäytyskokeissa tyypilliset pysäytysmatkat olivat joitakin kymmeniä metrejä. Pysäytysmatkaan vaikuttavat merkittävimmät tekijät ovat pysäytettävän kaluston nopeus, kaluston kokonaispaino, ensimmäisen vaunun akselipaino ja raiteen pituuskaltevuus. Mahdollisia pysäyttävän raiteensulun käyttökohteita ovat kohtausraide, kuormauspaikka, ratatyön tai pääteliikennepaikan suojaaminen. Pysäyttävän raiteensulun tuotekehitysprojektin tuloksena on turvalaite, joka voidaan ottaa käyttöön sille soveltuviin paikkoihin.

Tero Savolainen: Stoppande spårspärr – Utveckling och införande. Trafikverket, infrastruktur och miljö. Helsingfors 2013. Trafikverkets undersökningar och utredningar 39/2013. 87 sidor och 4 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-304-1.

Sammanfattning

En stoppande spårspärr är en ny banteknisk säkerhetsanordning, med hjälp av vilken fritt rullande vagnar kan stannas på ett kontrollerat sätt med hjälp av glidfriktion. I arbetets början presenteras ett sammandrag av produktutvecklingsprojektet som började 2005. Efter sammandraget studeras den stoppande spårspärrens teoretiska funktion, produktutvecklingsmöjligheter och nödvändiga fortsatta undersökningar samt frågor gällande användningen under anordningens livslängd.

Sammandraget av den stoppande spårspärrens produktutveckling presenteras i kronologisk ordning och samtidigt granskas de metoder och den provutrustning som använts vid produktutvecklingsfaserna samt de resultat som fåtts. Efter detta granskas fri rullning hos rullande materiel och stoppandet av materielen med en stoppande spårspärr teoretiskt. Utifrån de teoretiska studierna och resultaten i stopproven har man utvecklat en kalkylmodell som beskriver stoppsträckan hos en stoppande spårspärr. I arbetet presenteras nya produktutvecklingsmöjligheter med hjälp av vilka tillverkningskostnaderna kan sänkas och/eller eventuella användningsobjekt kan utvidgas. I avsnittet om införande granskas den stoppande spårspärrens eventuella användningsobjekt samt anordningens placering, styrning och underhåll.

Som en slutledning kan man konstatera att en stoppande spårspärr kan användas för att stanna materiel som rullar fritt med vagnarna före. Faktorer som begränsar placeringen och som hänför sig till säker användning ska beaktas vid planeringen av anordningens användning. I de genomförda stopproven var de typiska stoppsträckorna några tiotals meter. De mest betydande faktorerna som påverkar stoppsträckan var hastigheten hos den materiel som ska stoppas, materielens totalvikt, axelvikten hos den första vagnen och spårets längdlutning. Eventuella användningsobjekt för en stoppande spårspärr är mötesspår, lastplatser och skydd av banarbete eller sluttrafikplats. Resultatet av produktutvecklingsprojektet för en stoppande spårspärr är en säkerhetsanordning som kan införas på lämpliga ställen.

Tero Savolainen: Non-derailable stopping device – development and implementation. Finnish Transport Agency, Infrastructure and the Environment. Helsinki 2013. Research reports of the Finnish Transport Agency 39/2013. 87 pages and 4 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-304-1.

Summary

A non-derailable stopping device is a new railway signalling device which uses sliding friction to stop freely moving rolling stock. The development project started at 2005 is summarized in the beginning of this thesis. After the summary, the properties of non-derailable stopping device has been studied including physics theory, the development opportunities and the necessary further development as well as operational matters during life cycle.

The product development of non-derailable stopping device is summarized in chronological order presenting used methods, test equipment and results. After this, theoretical studies of rolling stock moving freely and stopping by non-derailable stopping device are submitted. Based on theoretical studies and stopping test results, stopping distance calculation model has been developed. This thesis introduces new product development possibilities to reduce manufacturing costs and/or extend potential applications. Possible applications, locating, controlling and maintenance of non-derailable stopping device have been studied in the implementation section.

As a conclusion, non-derailable stopping device can be used to stop freely moving rolling stock coming wagon first. Planning use of the device, the safety factors limiting the location shall be taken into account. Typical stopping distances in stopping tests were few tens of metres. Speed and total weight of rolling stock, axle load of the first wagon and track longitudinal gradient are the most significant factors which affect to stopping distance. Possible applications of non-derailable stopping device are encounter track, loading area, protection of track work and terminal railway operating location. The result of the non-derailable stopping device development project is a signalling device which can be implemented in places appropriate for use.

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty VR Track Oy:n Suunnittelu-liiketoimintayksikön Rataverk-koryhmässä opinnäytteeksi Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun Koneenrakennustekniikan laitokselle. Diplomityön tilaaja on Liikennevirasto.

Työn valvojana toimi Koneenrakennustekniikan laitoksen professori Kalevi Ekman. VR Trackistä diplomityön ohjaajana toimi Laura Järvinen. Diplomityön ohjauksessa oli myös vahvasti mukana Matti Maijala.

Liikennevirastossa työtä ohjasivat Tuomo Viitalaa ja Jari Viitanen.

Helsingissä elokuussa 2013

Liikennevirasto
Infra- ja ympäristöosasto

Sisällysluettelo

MÄÄRITELMÄT JA SYMBOLIT	9
1 JOHDANTO.....	13
1.1 Tausta.....	13
1.2 Tavoitteet.....	14
1.3 Rajaukset	14
2 PYSÄYTTÄVÄN RAITEENSULUN TUOTEKEHITYS.....	15
2.1 Tuotekehityskaari	15
2.1.1 Pysäyttävän raiteensulun teoreettinen tarkastelu	16
2.1.2 Liukukitkakertoimen määrittäminen 11/2005–1/2006	18
2.1.3 Kenttäkoe 4/2006	21
2.1.4 Kitkakoe laboratorioissa 4/2006.....	23
2.1.5 Kenttäkoe 6/2006	23
2.1.6 Kenttäkoe 10/2006	25
2.1.7 Vierintäkokeet.....	27
2.1.8 Kalustoselvitys.....	27
2.1.9 Pysäytinkengän minimikorkeus 11/2007	29
2.1.10 Kenttäkoe 9/2008	31
2.1.11 Kääntömekanismin kehitys	32
2.1.12 Pysäyttävän raiteensulun koekäyttö Riihimäen ratapihalla.....	34
2.1.13 Kenttäkoe 5/2010.....	34
2.1.14 Kustannusvertailu	36
2.1.15 Riskianalyysi	38
2.1.16 Kaksisuuntainen pysäytinkengä	39
2.2 Tuotekehityskaaren yhteenveto	39
3 PYSÄYTTÄVÄN RAITEENSULUN TOIMINNAN TEOREETTINEN TARKASTELU.....	42
3.1 Liikkuvan kaluston vapaa vierintä.....	42
3.2 Pahimman mahdollisen tilanteen arviointi	43
3.3 Vierintää vastustavat voimat	44
3.4 Kitkaelementin liukukitkakerroin.....	45
3.5 Liikkuvan kaluston pysäyttäminen	47
4 PYSÄYTYSKOKEIDEN TULOKSET JA PYSÄYTYSMATKAN ARVIOINTI	50
4.1 Pysäytyskokeiden tulosten tarkastelua	50
4.2 Pysäytysmatkan arviointi laskentamallin avulla	52
4.2.1 Pysäytystapahtuman muuttujien valinta	52
4.2.2 Pysäytysmatka eri tilanteissa	54
5 PYSÄYTTÄVÄN RAITEENSULUN KEHITYSEHDOTUKSET	58
5.1 Kustannuslaskelmat	58
5.2 Kääntömekanismi	59
5.2.1 Hydraulikoneikko	60
5.2.2 Sähkösylinteri	60
5.3 Pysäytinkengän käyttäytyminen vaihteessa	61
5.4 Tilapäiseen suojaukseen soveltuva pysäyttävä raiteensulku	63
5.5 Pysäytinkengien tuotantotekninen tarkastelu	64
5.5.1 Kitkaelementin rakenteen muuttaminen	64
5.5.2 Pysäytinkengän rakenteen muutokset	66

6	PYSÄYTTÄVÄN RAITEENSULUN KÄYTTÖÖNOTTO	67
6.1	Käyttöpaikan vaatimukset	67
6.2	Käyttökohteet.....	67
6.2.1	Kohtausraide	68
6.2.2	Kuormauspaikka	69
6.2.3	Vaarallisten aineiden kuljetus.....	71
6.2.4	Ratatyö	71
6.2.5	Helsingin päärautatieasema.....	72
6.2.6	Parkanon radan turvavaihteiden uusiminen.....	74
6.3	Sijoittaminen.....	76
6.4	Ohjaus.....	77
6.5	Kunnossapito	78
7	YHTEENVETO JA KEHITYSMAHDOLLISUUDET.....	80
7.1	Yhteenveto ja johtopäätökset	80
7.2	Jatkokehitysmahdollisuudet	81
7.3	Lisäselvitystarpeet	82
	LÄHDELUETTELO	83
	LIITTEET	
	Liite 1 Kustannusvertailu	
	Liite 2 Riskianalyysi	
	Liite 3 Kaksisuuntaisen pysäytinkengän kokoonpanopiirustus, Konepaja Mankinen Oy	
	Liite 4 Pysäytyskokeiden tulokset	
	Liite 5 Helsingin raiteistokaavio sekä suunnitellut pysäyttävän raiteensulun asennuspaikat	

Määritelmät ja symbolit

Lyhenteet ja nimikkeet

BOppy	Ratapölkkyjen kuljetusvaunu
Dr14	Raskas dieselveturi
Dv12	Väliraskas dieselveturi
Elo-t	Irtotavaravaunu
FLIRT	Sähkömoottorijunayksikkö. Kalustosarjatunnus Sm5. FLIRT on lyhenne sanoista Fast Light Innovative Regional Train.
Hkb	Avotavaravaunu
IC	InterCity-vaunu
JKV	Junien kulunvalvonta
SNCF	Ranskan rautatiet, Société Nationale des Chemins de fer Français
Tabkk	Keräyspaperivaunu
UNP	Kuumavalssattu U:n muotoinen teräsprofiili

Kirjainsymbolit

Tunnus	Suure	Yksikön tunnus
α	raiteen pituuskaltevuus	rad
μ	liukukitkakerroin	dimensioton
E	energia	J
e	vierintävastuskerroin	dimensioton
F	voima	N
g	gravitaatiokiihtyvyys (9,81m/s ²)	m/s ²
h	korkeus	m
I	raiteen pituuskaltevuus	‰
k	akselipainon korjauskerroin	dimensioton
l	pituus	m
m	massa	kg
M	systeemin kokonaismassa	kg
R	liikettä vastustava voima	N
s	matka	m
v	nopeus	m/s
V	nopeus	km/h
W	työ	J
x	määrä	kpl

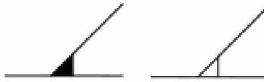
Piirrossymbolit



Suistavan raiteensulun symboleja



Pysäyttävän raiteensulun symboli tässä työssä



Vaihteen symboleja



Raiteen päätepuskin



Opastin



Avainsalpalaitte on laite, jossa valvotaan käännettävän kohteen (vaihde tai raiteensulku) käyttöavainta



Varmistusrakon symboleja



Kulunvalvonnan informaatiopiste



Raideosuuden raja

Termit ja käsitteet

Akselipaino

Liikkuvan kaluston akselipainolla tarkoitetaan veturin tai vaunun yhden akselin molempien pyörien eli pyöräkerran raiteeseen kohdistamaa staattista painoa. Akselipainon yksikön tunnus on kN.

Asetinlaite

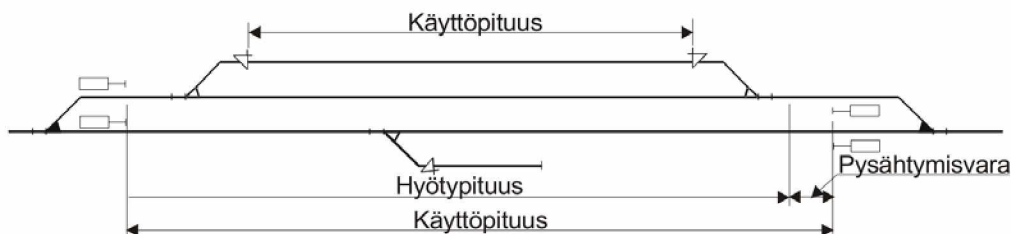
Asetinlaite on järjestelmä, jota käytetään kulkuteiden varmistamiseen. Asetinlaite varmistaa kulkutie-ehtojen täyttymisen kulkutietä asetettaessa ja kulkutien varmistamiseen liittyvät toimenpiteet.

Aukean tilan ulottuma

Raiteen aukealla tilalla tarkoitetaan sitä raidetta pitkin ulottuvaa tilaa, jonka sisäpuolella ei saa olla kiinteitä rakenteita eikä laitteita.

Hyötypituus

Hyötypituus ilmoittaa sen pituuden raiteesta, jota voidaan käyttää junaliikenteessä silloin, kun junan on mahdollista pysähtymään kyseiselle raiteelle.



Juna

Junalla tarkoitetaan kalustoa, joka on määrätty junaksi ja jonka liikennöinnissä on noudatettava junaliikennettä koskevia määräyksiä.

Kaksoisjarrutönkkä

Kaluston jarrujärjestelmä, jossa on kaksi pyörään painautuvaa jarrupalaa.

Kiskon selän korkeus

Kiskon selän korkeus on kiskon hamaran päältä korkeimmalta kohdalta vaakasuoraan mitattu taso.

Kitkaelementti

Kitkaelementti on pysäyttävän raiteensulun pysäytinkengän osa, joka pysäyttäessä liukuu kiskon päällä.

Kulcutie

Kulcutie on turvalaitejärjestelmän varmistama reitti. Kulcutiehen kuuluvat sillä olevat opastimet, vaihteet, raiteensulut ja raideosuudet. Kulcutiehen liittyvät mahdolliset sivusuoja- ja ohiajovaraelementit. Kulcutie voidaan varmistaa juna- tai vaihtokulcutien ehdoin.

Kuormauspaikka

Kuormauspaikka on rautatieliikennepaikan raide, jossa tehdään kuormausta ja purkua.

Käyttöpituus

Käyttöpituus on se osa raidetta, jolla liikkuvaa kalustoa voidaan pysäköidä sen estämättä liikennöimistä viereisillä raiteilla. Katso kuva kohdasta *Hyötypituus*.

Kääntölaite

Tässä työssä kääntölaite on sähkömekaaninen laite, jonka avulla pysäyttävä raiteensulku saadaan käännettyä kiskoille ja kiskoilta pois.

Kohtausraide

Kohtausraide on tarkoitettu yksiköiden kohtauksiin ja ohituksiin sekä muihin liikenteen ohjaamisen tarpeisiin.

Liikkuva kalusto

Liikkuva kalusto on raiteella olevaa kalustoa, joka on esitetty liikkuvan kaluston rekisterissä tai on saanut luvan liikkua radalla tilapäisellä käyttöluvalla.

Opastinvara

Opastinvara on kulcutien päättävän opastimen takana oleva matka, jolle pysähtyvä opastimen ohittava yksikkö ei aiheuta vaaraa viereisten raiteiden liikennöinnille.

Pituuskaltevuus

Pituuskaltevuus ilmoittaa raiteen pituussuuntaisen kaltevuuden vaakatasoon nähden. Pituuskaltevuus ilmoitetaan promilleina (‰). Pituuskaltevuuden negatiivinen arvo tarkoittaa alamäkeä liikkeen suuntaan.

Pysähtymisvara

Pysähtymisvara on raiteen se pituus, joka hyötypituuden lisäksi on osa raiteen käyttö-pituutta. Katso kuva kohdasta *Hyötypituus*.

Pysäytinkenkä

Pysäytinkenkä on kiskoille nouseva pysäyttävän raiteensulun osa.

Pysäyttävä raiteensulku

Pysäyttävä raiteensulku on turvalaite, joka koostuu pysäytinkengistä ja niiden kääntöön ja ohjaukseen tarvittavasta laitteistosta.

Rajamerkki

Rajamerkki on kohta, johon saakka raidetta voi liikennöidä estämättä viereisen raiteen liikennöintiä.

Sivusuoja

Sivusuoja on elementti, jolla suojataan varmistettua kulkutietä tai paikallislupa-ryhmää, jonka paikallislupa on annettuna, muulta liikennöinniltä.

Turvavaihde

Turvavaihde on vaihde, jonka ainoa tehtävä on antaa sivusuoja. Myös muuta vaihdetta kuin turvavaihdetta voidaan käyttää antamaan sivusuoja.

Vaihteen aukiajo

Vaihteen aukiajo on tilanne, jossa ajetaan myötävaihteeseen sen ollessa kulkusuuntaan nähden väärässä asennossa.

Yksikkö

Yksikkö on juna tai muu raiteella liikkuva kalusto, joka on yksi kokonaisuus.

1 Johdanto

1.1 Tausta

Suomen rautateilla on käytössä noin 660 veturia ja 12 000 vaunua, jotka toimivat yhteensä 470 rautatieliikennepaikalla. Vuotuinen junien kokonaiskulkumatka on yli 53 miljoonaa kilometriä. [1] Turvallisuuden takaamiseksi junaliikenteen on oltava tarkasti suunniteltua ja ohjattua. Tarkasta liikenteenohjauksesta huolimatta, turvallisuus voi vaarantua kalustovian, radan infrastruktuurissa olevan vian tai inhimillisen erehdyksen seurauksena. Näistä merkittävin vaara on inhimillinen erehdys. Erilaisten turvalaiteratkaisujen avulla pyritään välttämään näiden vaarojen aiheuttamilta onnettomuuksilta. Turvalaitteet pyritään suunnittelemaan siten, että onnettomuuteen johtaa vasta useampi yhtäaikainen virhe ja/tai sattuma.

Junakulhutiet on Suomessa turvattu sivusuojilla, joiden tarkoituksena on estää muun kaluston pääsy suojatulle raiteelle. Junakulhutien sivusuojana voi toimia opastin, turvavaihte tai raiteensulku. Opastin on yleinen sivusuoja kohtausraiteilla. Opastin antaa hyvän sivusuojan, jos kuljettaja tai vaihtotyön ohjaaja havaitsee sen sekä noudattaa opastetta. Sen sijaan opastin ei anna minkäänlaista suojaa vapaasti vierivää kalustoa vastaan. Paras sivusuoja saadaan aikaan turvavaihteella. Turvavaihte ohjaa ilman lupaa lähestyvän kaluston pois suojattavasta kulkutiestä. Turvavaihteen huonoina puolina ovat kallis alkuinvestointi ja korkeat kunnossapito- ja käyttökustannukset. Kuormauspaikoilla yleisin sivusuoja on käsikäyttöinen raiteensulku. Raiteensulku estää kuormauksessa tai seisonnassa olevan kaluston luvattoman pääsyn viereisen raiteen kulkutielle. Kuva 1 esittää nykyisin käytössä olevaa kaksitoimista raiteensulkua. Hyvin hiljaisella nopeudella raiteensulku pyrkii pysäyttämään liikkuvan kaluston ja suuremmilla nopeuksilla se suistaa kaluston kiskoilta. Kuvan raiteensulku suistaa vasemmalta lähestyvän kaluston vasemmalle. Suistavalla raiteensululla on myös huonoja ominaisuuksia: Turvallisen suiston takaamiseksi raiteen viereistä pengerialueita joudutaan kasvattamaan, jotta suistettu kalusto ei kaadu. Suistaminen vaurioittaa raidetta ja/tai kalustoa, mistä aiheutuu korjauskustannuksia. Suistaminen voi myös epäonnistua ja kalusto suistua kulkutielle. Vastaan on tullut myös tapauksia, joissa kevyt vaunu on jousituksensa ansiosta noussut raiteensulun ylitse palaten takaisin kiskoille ja aiheuttanut vaaratilanteen.



Kuva 1 Sivusuojana toimiva nykyinen raiteensulku [2]

Vuonna 2004 Oy VR-Rata Ab (1.11.2010 alkaen VR Track Oy) aloitti Ratahallintokeskuksen (1.1.2010 alkaen Liikennevirasto) tilaaman Sivusuoja-projektin, jonka tarkoituksena oli raiteensulun kehittäminen ja sivusuojavaihtoehtojen vertailu sekä selvitys liikennepaikkojen raidepituuksien paremmasta hyödyntämisestä. Vuoden 2005 alkupuolella syntyi idea kaluston mukaan lähtevästä pysäyttävästä raiteensulusta. Idea esiteltiin Ratahallintokeskukselle maaliskuussa 2005 ja projekti käynnistyi samana vuonna Ratahallintokeskuksen ja VR-Radan yhteistyönä. VR-Radalta projektissa ovat olleet mukana Rautatiesuunnittelu ja Sähköasennuskeskus. Pysäytyskokeiden vetokalusto asioista on vastannut VR Osakeyhtiö (1.11.2010 alkaen VR Group) ja vaunuista VR Cargo (1.11.2010 alkaen VR Transpoint). Pysäyttävän raiteensulun tuotekehitysprojektissa ovat olleet mukana Teknillisen korkeakoulun Rakenteiden mekaniikan ja Tietekniikan laboratoriot, Teknikum Oy sekä Konepaja Mankinen Oy. Rautatievirasto (1.10.2010 alkaen Trafi) on ollut mukana ideoinnissa ja antanut kommentteja laitteen käyttöönotosta. [3]

1.2 Tavoitteet

Tämän työn keskeiset tavoitteet ovat tuotekehitysprojektin yhteenveto, laitteen konstruktiiivisten parannusehdotusten esittäminen sekä laitteen käyttöönottoon liittyvien asioiden selvittäminen. Pysäyttävän raiteensulun kehitys on alkanut vuonna 2005. Tässä työssä on tarkoituksena analysoida vuosina 2005–2010 tehtyjä selvityksiä ja kenttäkokeita yhtenä kokonaisuutena. Työssä pyritään tuomaan esille mahdollisia kehitysehdotuksia, joiden avulla voitaisiin parantaa laitteen toimintaa tai alentaa sen valmistuskustannuksia ottaen huomioon kunnossapito- ja/tai elinkaari-kustannukset. Käyttöönotto-osiossa esitetään mahdollisia käyttökohteita, joissa pysäyttävä raiteensulku tuo lisäsuojaa tai kustannusetua. Käyttöönoton pohdinnan vertailukohtana käytetään nykyisiä turvalaiteratkaisuja. Osiossa tarkastellaan myös pysäyttävän raiteensulun ohjauksen ja valvonnan toteuttamista sekä laitteen kunnossapitoa.

1.3 Rajaukset

Tässä työssä keskitytään vuonna 2005 alkaneen Pysäyttävä raiteensulku -projektin aikana syntyneen prototyypin kehitykseen ja käyttöönottoon. Tuotekehityskaaren yhteenvetoon on sisällytetty diplomityön teon aikana (11.5.2010–26.1.2011) tehdyt selvitykset ja pysäyttävän raiteensulun parannukset. Työn teoriaosuudessa käsitellään pysäyttävän raiteensulun toimintaan liittyvää fysiikan teoriaa, jota käytetään pysäytyskokeiden tulosten tarkastelussa ja laitteen sijoituspaikan mitoituksessa. Tuotekehitysosiota rajaa diplomityöhön käytettävä aika ja rahalliset resurssit. Tämän takia osa kehitysideoista jätetään konseptiasteelle. Käyttökohteiden maantieteellisenä rajauksena toimii Suomessa oleva Liikenneviraston tai yksityis-raiteen omistajan hallussa oleva rataverkko.

2 Pysäyttävän raiteensulun tuotekehitys

2.1 Tuotekehityskaari

Sivusuojan tutkimus aloitettiin VR-Radalla vuonna 2004. Tutkimuksen tavoitteena oli erilaisten sivusuojavaihtoehtojen vertailu. Selvityksen perusteella laadittiin Sivusuoja tutkimus-raportti, joka esitti sivusuojana toimivan raiteensulun ja turvavaihteen jatkotutkimista [3].

Vuonna 2005 syntyi idea kaluston mukaan lähtevästä ja hallitusti pysäyttävästä kengästä, niin sanotusta pysäyttävästä raiteensulusta. Tämä idea esiteltiin Ratahallintokeskukselle ja samana vuonna käynnistyi Ratahallintokeskuksen ja VR-Radan yhteishanke pysäyttävän raiteensulun kehittämiseksi. Tuotekehitysprojektissa ovat olleet alusta asti mukana Teknillisen korkeakoulun Rakenteiden mekaniikan ja Tietekniikan laboratoriot sekä Teknikum Oy. Myöhemmässä vaiheessa pysäyttävän raiteensulun tuotekehitykseen on antanut oman panoksensa myös Konepaja Mankinen Oy. Pysäyttävän raiteensulun tuotekehitys on mennyt vuodesta 2005 paljon eteenpäin. Vuodesta 2009 lähtien Riihimäen liikennepaikalla on ollut sivusuojana koekäytössä tuotekehitysprojektin tuloksena syntynyt pysäyttävä raiteensulku. Taulukko 1 esittää pysäyttävän raiteensulun tuotekehityskaaren vaihteita vuodesta 2005 vuoteen 2010. Taulukko on jaoteltu tapahtumien luonteen perusteella neljään eri väriin. Kappaleissa 2.1.1–2.1.16 esitellään erikseen jokainen tuotekehityksen päävaihe, sen menetelmät ja siinä saadut tulokset.

Taulukko 1 Pysäyttävän raiteensulun kehityksen vaiheet

	Teoreettinen tarkastelu	Laboratoriok	Kenttäkoe	Muu tapahtuma
3/2005	Tuotekehitysprojektin käynnistäminen.			
9/2005	Junan pysäytinkengän analyysi ja kehitystutkimus.			
11/2005	Kitkakoe laboratoriossa.			
12/2005	1. Kenttäkoe. Tarkoituksena selvittää kumimateriaalin kestävyys ja todellinen liukukitkakerroin.			
1/2006	Kitkakoe laboratoriossa.			
1/2006	Kitkakoe laboratoriossa.			
1/2006	Junan tavaravaununon pysäytinlaitteen kitkaelementin kitkakokeet.			
2/2006	Pysäytyskengän kitkakertoimen määrittäminen.			
4/2006	Kitkakoe laboratoriossa.			
4/2006 & 6/2006	2. Kenttäkoe. Tavoitteena testata pysäytinkengien vakaus törmäys- ja pysäytysvaiheessa sekä laitteen pysäytyskykyä.			
6/2006	Junan vaunujen pysäytinlaitteen kenttä- ja laboratoriokokeiden tuloksia.			
8/2006	Kääntölaitteen kartoitus ja valinta sekä kääntömekanismin kehitys.			
6/2006	Junan vaunujen pysäytinlaitteen kenttä- ja laboratoriokokeiden tuloksia.			
10/2006	3. Kenttäkoe. Tavoitteena testata kaluston vapaata vierimistä sekä pysäyttävän raiteensulun pysäytyskykyä.			
3/2007	Täyden mittakaavan pysäytyskokeet, analyysi ja johtopäätökset.			
4/2007	Kalustoselvitys. Tavoitteena selvittää kaluston rajoitukset.			
7/2007	4. Kenttäkoe. Tavoitteena selvittää pysäytinkengän minimikorkeus.			
9/2007	Pysäyttävän raiteensulun tarvittavan korkeuden teoreettinen ja kokeellinen arviointi sekä valintakokeiden tulosten tarkastelu.			
2007	Kääntömekanismin 1. versio, vipumekanismi.			
9/2008	5. Kenttäkoe. Tavoitteena selvittää liitosruuvien kesto sekä leikkautuminen.			
2008	Kääntömekanismin 2. versio, hammastanko ja -pyörät.			
5/2009	Pysäyttävä raiteensulku koekäyttöön Riihimäellä.			
5/2010	6. Kenttäkoe. Tavoitteena selvittää laitteen toimivuus suuremmilla nopeuksilla.			
6/2010	Pysäyttävän raiteensulun kustannusvertailu.			
6/2010	Sivusuojan riskianalyysi.			

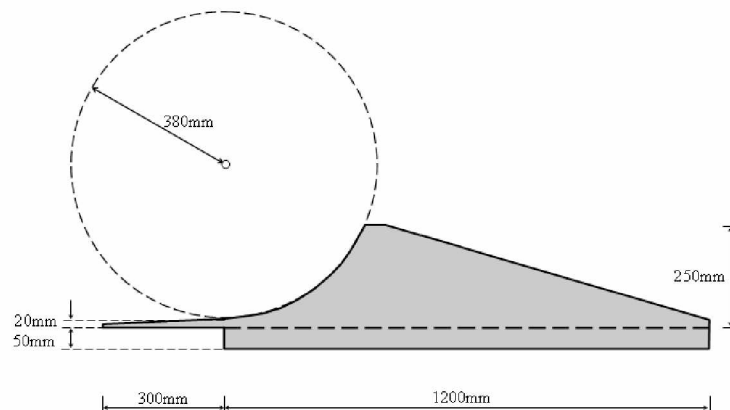
2.1.1 Pysäyttävän raiteensulun teoreettinen tarkastelu

Junan pysäytyskengän analyysi ja kehitystutkimus -raportissa tarkastellaan kaltevalla ratapihalla vapaasti vierimään päässeen vaununon pysäyttävää laitetta, pysäyttävää raiteensulkuja. Raportin tarkoituksena on selvittää pysäyttävän raiteensulun toimintamahdollisuuksia ja edellytyksiä. Raportin alkuosassa on tarkasteltu yksinkertaisilla kaavoilla seuraavat asiat:

- **Junan vapaa vierintä:** nopeus, vierintämatka
- **Junan pysäyttäminen:** liukukitkakertoimen alaraja, pysäytysmatka, akseli-painon korjauskerroin
- **Junan vierintä ja pysäyttäminen:** junan nopeus pysäytyksen alussa
- **Ehdot sille, että pysäytyskenkä lähtee junan mukaan:** liukukitkakertoimen yläaraja, pysäytinkengän korkeuden alaraja

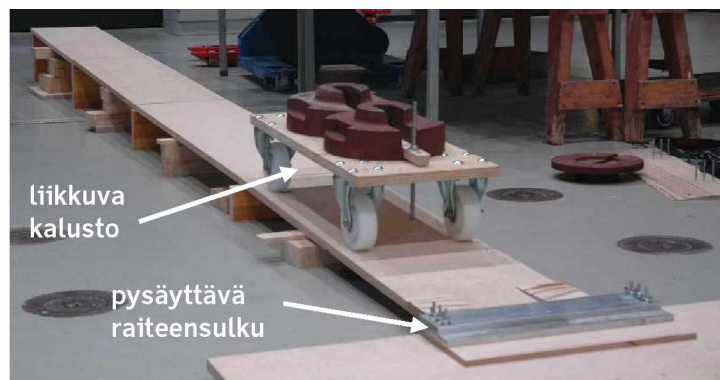
- Kengän alapinnan ulottuma, joka synnyttää mahdollisimman tasaisen kosketuspaineen kelkan ja kiskon rajapinnalla.

Kaavojen tulosten perusteella on muodostettu pysäyttävän raiteensulun pysäytinkengän rakenteen ensimmäinen ehdotelma (Kuva 2). [4] Pysäyttävän raiteensulun idea on pysäyttää vapaasti vierivä kalusto hallitusti liukukitkan avulla. Liukukitka muodostuu kiskon ja pysäytinkengän välisestä liukukitkakertoimesta sekä kaluston ensimmäisen pyöräkerran tuottamasta kosketuspaineesta.



Kuva 2 Ehdotus pysäyttävän raiteensulun rakenteesta [4]

Teoreettisten kaavojen toimivuutta testattiin käytännössä pienoismallikokeiden avulla (Kuva 3). Kokeessa liikkuvaa kalustoa kuvaava vaunu laitettiin vierimään kaltevaa vaneritasoa pitkin. Vaunu törmäsi pysäyttävän raiteensulun pienoismalliin ja systeemin liukumatka mitattiin. Pysäyttävän raiteensulun pienoismallin pohjassa oli hiekkapaperilevy, jonka liukukitkakertoain vaneripintaa vasten on noin yksi. Pysäytinkengän korkeutta voitiin muuttaa 3 mm välein. Koevaunun massaa oli mahdollista muuttaa irtopainojen avulla.



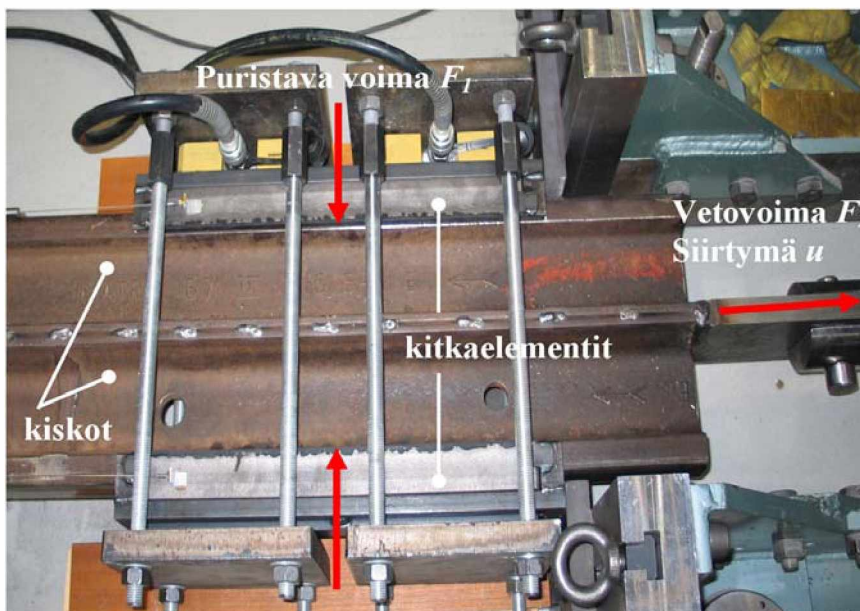
Kuva 3 Pysäyttävän raiteensulun pienoismallikokeet [4]

Pienoismallikokeiden perusteella voidaan todeta, että vapaasta vierinnästä esitetyt kaavat ovat toimivia. Liukukitkakertoimen alarajan ja pysäytysmatkan kaavat ovat käyttökelpoisia, mutta näiden kaavojen antamat tulokset ovat suurempia kuin tehdyissä kokeissa. Liukukitkakertoimen ylärajan ja kengän korkeuden alarajan kaavoilla voidaan antaa vain arvioita kyseisistä suureista. Tarkasteluissa pysäyttävän raiteensulun liukukitkakertoimen ja siten myös junan hidastuvuus on oletettu vakioiksi. Tarkasteluissa ei ole huomioitu vierintävastusta eikä ilmanvastusta. [4]

Teorioiden ja pienoismallikokeiden perusteella pysäyttävän raiteensulun kiskoa vasten tuleva normaalivoima kasvaa pysäytyksen aikana hidastuvuuden ansiosta lisäten kitkavoimaa ja lyhentäen jarrutusmatkaa. Tämä on erittäin hyvä ominaisuus laitteen toiminnan kannalta. Pysäytinkengän korkeuden on oltava mahdollisimman matala, jotta se soveltuu monen tyyppiselle kalustolle. Korkeuden on silti oltava niin suuri, ettei törmäävän kaluston pyöräkerta nouse pysäytinkengän ylitse. Tarkastelussa pysäytinkengän korkeuden ylärajaksi valittiin 112 mm, joka on kaksoisjarrutönkän minimikorkeus kiskon selän korkeudesta mitattuna. Tällä korkeudella liukukitkakertoimen yläraja jää niin alhaiseksi, ettei pysäytysvoima ole riittävä. Pysäytysvoima riippuu liukukitkakertoimesta ja kosketuspaineesta. Liukukitkakertoimen kasvaessa kasvaa myös pysäytysvoima ja kaluston hidastuvuus. Hidastuvuuden kasvaessa törmäävä pyöräkerta pyrkii voimakkaammin pysäytinkenkien yli. Käytännön rajoitusten perusteella raportti suosittelee liukukitkaan perustuvan pysäytinlaitteen jatkokehitykseen toisenlaista ratkaisua. Ratkaisu voisi olla pyörään tarttuva kiinnitysmekanismi tai pysäytinlaite, jossa pysäyttävä kitkavoima välittyy liikkuvaan kalustoon etummaisen puskimen kautta. [4]

2.1.2 Liukukitkakertoimen määrittäminen 11/2005–1/2006

Junan pysäytyskengän analyysi ja kehitystutkimus -raportti ei suosittele kitkaan perustuvalle raiteensululle kenkämäistä rakennetta. Tästä huolimatta, kenkämäisen raiteensulun mahdollisuuksia haluttiin selvittää tarkemmin ja Pysäyttävä raiteensulku -projektia päätettiin jatkaa. Pysäyttävän raiteensulun liukukitkakerrointa tutkittiin kolmeen otteeseen Teknillisen korkeakoulun Rakennustekniikan osastolla. Koelaitteistossa vulkanoituja UNP 100 -teräsprofiileja puristettiin voimalla F_1 kohti kiskoja ja samaan aikaan kiskoja vedettiin voimalla F_2 tarkkaillen siirtymää u (Kuva 4). Siirtymänopeuden ollessa vakio vetovoima F_2 on yhtä suuri kuin kitkavoima F_{μ} . Liukukitkakerroin saadaan yhtälöstä $\mu = F_2 / 2F_1$.



Kuva 4 Koelaitteisto liukukitkakertoimen määrittämiseksi [5]

Kokeiden perusteella huomataan liukukitkakertoimen riippuvan kosketuspaineesta. Pysäyttävän raiteensulun liukukitkakertoimelle saadaan määritettyä seuraava kaava.

$$\mu = \frac{1}{A + Bp}, \quad (1)$$

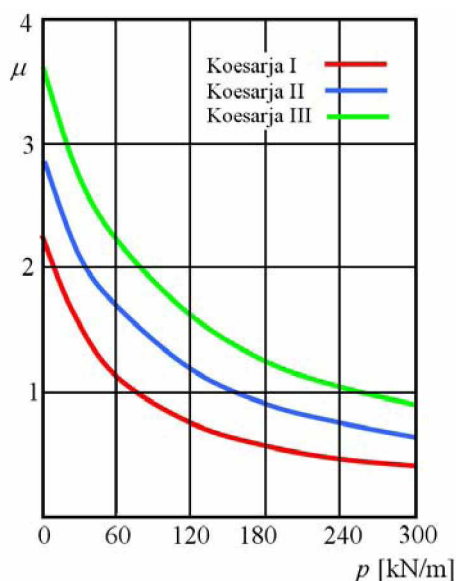
jossa A on koesarjakohtainen vakio
 B on koesarjakohtainen vakio
 p on kosketuspaine.

Vastoin odotuksia, liukukitkakerroin riippui selvästi koesarjasta. Jokaiselle koesarjalle määritettiin omat vakioarvot (Taulukko 2). Kokeissa ei löydetty tarkkaa syytä koesarjojen liukukitkakertoimien eroille. [5]

Taulukko 2 Liukukitkakertoimen kaavan vakioiden arvot eri koesarjoilla

Koesarja	A	B
I	0,4566	0,0076
II	0,3531	0,0042
III	0,2764	0,0029

Liukukitkakertoimen ja kosketuspaineen riippuvuudella saadaan seuraavan kuvan mukainen graafinen esitys (Kuva 5).



Kuva 5 Liukukitkakertoimen riippuvuus kosketuspaineesta koesarjoilla I–III [5]

Kuvan 5 kuvaajasta havaitaan, että liukukitkakerroin on pienillä kosketuspaineilla suuri. Tästä on etua tilanteessa, jossa pysäyttävään raiteensulkuun törmäävän liikkuvan kaluston ensimmäisen pyöräkerran akselipaino on pieni. Suurilla kosketuspaineilla liukukitkakerroin on taas huomattavasti alhaisempi. Tästä on etua siinä, ettei törmäävän kaluston ensimmäinen pyöräkerta nouse pysäytinkengän ylitse liian suuren kitkavoiman aiheuttaman hidastuvuuden takia. Pienempi liukukitkakerroin suurella kosketuspaineella auttaa myös pysäytinkengkiä kestämään paremmin törmäyksestä aiheutuvat rasitukset.

Keskimääräisen liukukitkakertoimen määrittämiseksi kehitettiin iteratiivinen menetelmä, jonka ratkaisemiseksi tehtiin ohjelma, joka käyttää elementtimenetelmän systematiikkaa ja niin sanottua kimmoisalla alustalla olevan palkin mallia. Menetelmällä määritettiin pysäyttävän raiteensulun liukukitkakertoimet tyhjälle ja täydelle vaunulle taulukossa 2 esitettyjen koesarjojen vakioiden arvoilla. Määritetyt liukukitkakertoimet on esitetty taulukossa 3. Taulukossa F_N on kosketusvoima, F_μ on kitkavoima ja μ_{kesk} on keskimääräinen liukukitkakerroin. Kitkavoima on liukukitkakertoimen ja kosketusvoiman tulo. [5]

Taulukko 3 Liukukitkakerroin tyhjällä ja täydellä vaunulla [5]

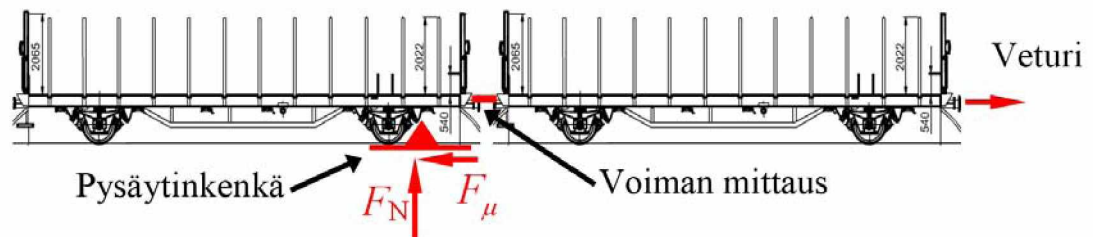
Koesarja	F_N (kN)	F_μ (kN)	μ_{kesk}
I	30	44,53	1,48
II	30	53,87	1,80
III	30	59,42	1,98
I	125	107,76	0,86
II	125	158,31	1,27
III	125	202,18	1,62

Vuoden 2005 lopulla järjestettiin Tampereella vetokoe oikealla kalustolla. Kokeen tarkoituksena oli varmistaa, että laboratoriokokeissa määritetyt kitkaominaisuudet ovat voimassa todellisissa olosuhteissa. Tavoitteena oli myös testata kumimateriaalin kestoja. Vetokokeita varten valmistettiin koelaitte, joka koostui kahdesta pysäytinkengästä, jotka yhdistettiin toisiinsa vaakasitein (Kuva 6). Kummankin pysäytinkengän pohjaan oli kiinnitetty kiskoa vasten liukuva vulkanoitu UNP 100 -teräsprofiili. [5]



Kuva 6 Vetokokeissa käytetty pysäyttävä raiteensulku [5]

Kokeissa pysäyttävä raiteensulku laitettiin tavaravaunun akselin eteen ja koko yhdistelmää vedettiin veturilla tasaisella nopeudella (Kuva 7). Kaluston liikkeessa vakionopeudella, kitkavoima F_μ on yhtä suuri kuin veturin vetovoima. Veturin vetovoima mitattiin vaunujen väliin kytketyllä voima-anturilla. [5]



Kuva 7 Vetokokeen koejärjestely

Vetokokeita tehtiin tyhjällä ja täydellä vaunulla eri nopeuksilla. Tyhjän vaunun akselipaino oli kokeissa 60 kN ja täyden vaunun akselipaino 250 kN. Kokeista saatiin seuraavan taulukon mukaiset tulokset (Taulukko 4). [5]

Taulukko 4 Vetokokeiden tulokset [5]

Vetokoe	Tavoitenopeus (km/h)	F_N (kN)	F_μ (kN)	μ_{kesk}
Tyhjä 1	2	60	53,5	0,89
Tyhjä 2	5	60	48,1	0,80
Tyhjä 3	10	60	60,0	1,00
Täysi 2	8–11	250	104,5	0,42
Täysi 3	5	250	122,4	0,49

Kenttäkokeiden liukukitkakertoimet 0,42–1,00 ovat selvästi pienemmät kuin laboratoriomittauksien liukukitkakertoimet 0,86–1,98. Laboratorio- ja kenttäkokeiden perusteella huomataan, että keskimääräisen liukukitkakertoimen määrittäminen on odotettua hankalampaa. Kosketuspaineen lisäksi liukukitkakertoimeen vaikuttavia suureita on myös muita, mutta niiden vaikutusta ei ole kokeissa selvitetty. Vetokokeissa käytetty kumimateriaali kesti siihen aiheutuvat rasitukset, joten sitä voitiin käyttää myös seuraavissa kokeissa.

2.1.3 Kenttäkoe 4/2006

Ensimmäinen pysäyttävän raiteensulun pysäytyskoe järjestettiin Tampereella Lielahden ratapihalla 10.4.2006. Kokeessa käytetty pysäyttävän raiteensulun ensimmäinen prototyyppi muodostui kahdesta erillisestä pysäytinkengästä (Kuva 8). Prototyypin pituus ilman nousukiiloja oli 1500 mm ja sen pohjaan oli vulkanoitu kolme 500 mm pitkää kumielementtiä. Pysäytyskokeissa käytetty kalusto koostui kahdesta Dv12-veturista ja yhdestä kuormatusta Hkb-tavaravaunusta. Kaluston kokonaispaino oli 174 tonnia ja törmäävän vaunun akselipaino 190 kN. Raiteen pituuskaltevuus oli liikkeen suuntaan keskimäärin -1,25 ‰. [6]



Kuva 8 Pysäyttävä raiteensulku, 1. prototyyppi [6]

Kokeet aloitettiin kolmella työntökokeella. Kokeissa pysäytinkenkä työnnettiin pitkin kiskoja muutamia kymmeniä metriä. Kokeiden tarkoituksena oli testata itsenäisesti seisovien pysäytinkenkien vakautta kaluston pyöräkerran alla. Kokeissa pysäyttävän raiteensulun 1. prototyyppi todettiin riittävän vakaaksi varsinaisia pysäytyskokeita varten. [6]

Pysäytyskokeissa pysäyttävään raiteensulkuun törmättiin eri nopeuksilla mitaten pysäytysmatkaa (Taulukko 5). Nopeus mitattiin gps-paikannukseen perustuvalla vbox-laitteella. Kokeet 1 ja 2 suoritettiin samassa paikassa, mutta kokeisiin 3–8 valittiin raiteilta kohta, jossa pysäytyskokeita ei ollut aiemmin tehty. Tällä pyrittiin selvittämään kiskon pinnassa olevien epäpuhtauksien vaikutus pysäytysmatkaan. Ennen kokeita 9 ja 10 pysäytinkenkien kumit harjattiin, jotta pohjassa olevan irtokumin merkitys liukukitkakertoimeen saataisiin selville. Taulukon liukukitkakertoimet on määritetty laskennallisesti pysäytysmatkan perusteella. [6]

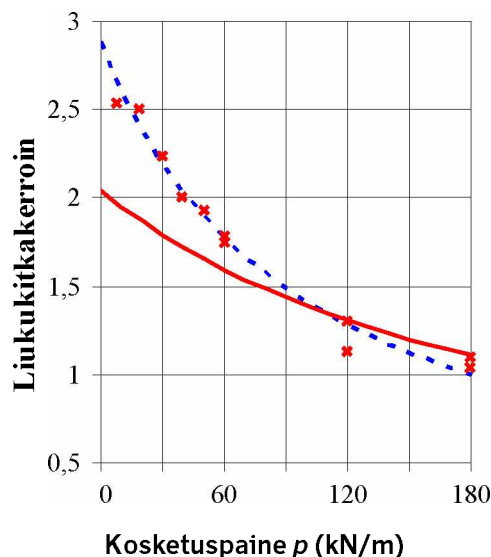
Taulukko 5 Pysäytysmatka ja laskennallinen liukukitkakerroin eri törmäysnopeuksilla [6]

Koe	Nopeus (km/h)	Pysäytysmatka (m)	Liukukitkakerroin
1	3,0	0,49	0,63
2	5,1	1,82	0,49
3	12,3	9,20	0,56
4	3,0	0,27	1,13
5	4,7	1,29	0,59
6	9,3	6,22	0,48
7	10,3	9,30	0,39
8	12,9	12,70	0,45
9	9,9	6,14	0,55
10	9,6	5,33	0,59

Kokeiden pysäytysmatkat olivat yhtä koetta lukuun ottamatta alle kymmenen metriä, joten pysäyttävä raiteensulku toimi hyvin. Kokeiden pisin pysäytysmatka 12,7 m mitattiin oletetusti suurimmalla törmäysnopeudella 12,9 km/h. Irtokumin vaikutus pysäytysmatkaan ei ole suuri. Kokeiden vähäisen määrän ja tuloksien hajonnan vuoksi, irtokumin tarkkaa vaikutusta liukukitkakertoimeen ei saatu selville. Lasketuista liukukitkakertoimista kahdeksan arvoa kymmenestä osuu välille 0,45–0,63. Liukukitkakertoimista kokeen neljä arvo 1,13 nousee selvästi keskiarvon 0,59 yläpuolelle. Tämä selittyy ainakin osittain alhaisella liukunopeudella. Neljännän kokeen liukukitkakertoimen eroavaisuus on varmempaan suuntaan, mikä on tuotteen toiminnan kannalta positiivinen asia.

2.1.4 Kitkakoe laboratoriossa 4/2006

Samaan aikaan Lielahden kenttäkokeiden kanssa 10.4.2006 tutkittiin Otaniemen Teknillisen korkeakoulun Rakennus- ja ympäristötekniikan koehallissa kitkaelementtien liukukitkakertoimia. Kokeet suoritettiin tarkoituksella samaan aikaan kenttäkokeiden kanssa. Näin kumin haurastumisen vaikutus saatiin suljettua pois. Käytetty koelaitteisto oli kuvan 5 mukainen. Liukukitkakertoimen kaava (Kaava 1) sovitettiin koetuloksiin pienimmän neliösumman menetelmällä. Koetulosten analysoinnissa on kenties tapahtunut virhe, sillä raportissa esitetty kuvaaja ei sovi tuloksiin. Tällä ei kuitenkaan ollut vaikutusta tuotekehitysprojektin jatkoon. Kuva 9 esittää liukukitkakertoimen sovitusta koetuloksiin. Kuvaajan punainen viiva on raportissa esitettyjen vakioiden mukainen liukukitkakerroin (Kaava 1: $A = 0,4984$ ja $B = 0,0023$) ja punaiset rastit ovat koetuloksia [6]. Esitettyjen vakioiden mukainen käyrä ei kuvaa koetuloksia. Kuvan sininen katkoviiva on sovitettu samalla menetelmällä ja sen huomataan sopivan paremmin koetuloksiin. Sinisen katkoviivan koesarjakohtaiset vakiot ovat $A = 0,3476$ ja $B = 0,0036$.



Kuva 9 Liukukitkakerroin kosketuspaineen funktiona

Laboratoriossa selvitetty liukukitkakertoimet ovat selvästi suurempia kuin kenttäkokeissa. Ero johtuu todennäköisesti liukunopeudesta, joka laboratoriolaitteistolla on välillä 0,001–0,04 km/h, kun taas kenttäkokeissa se on 2–12 km/h. Yleisesti liukukitkakerroin pienenee liukunopeuden kasvaessa [7, s. 74]. Kokeiden perusteella Rakennus- ja ympäristötekniikan laboratoriolaitteisto ei sovellu pysäyttävän raiteensulun liukukitkakertoimien määrittämiseen. Ilman lämpötilalla saattaa olla myös vaikutusta kenttäolosuhteiden huomattavasti pienempään liukukitkakertoimeen. [6]

2.1.5 Kenttäkoe 6/2006

Pysäyttävän raiteensulun kenttäkokeita jatkettiin parannetulla prototyypillä Lielahdessa 8.6.2006 (Kuva 10). Pysäytyskokeissa käytetty kalusto koostui yhdestä Dv12-veturista ja yhdestä tyhjästä Hkb-tavaravaunusta. Kaluston kokonaispaino oli 80,5 tonnia ja törmäävän vaunun akselipaino 62,5 kN. Kaluston nopeus mitattiin vbox-laitteella ja pysäytysmatka mittapyörällä. Kokeet aloitettiin vierintäkokeilla, joiden tarkoituksena oli selvittää koeyskikon vierintävastus. Vierintäkokeiden tulokset on esitetty kappaleessa 2.1.7. Toinen koe oli staattinen työntökoe nopeudella 5 km/h.

Kokeen tarkoituksena oli selvittää pysäyttävän raiteensulun toisen prototyypin vakautta kiskolla. Kolmannessa vaiheessa suoritettiin kahdeksan pysäytyskoetta eri nopeuksilla, joista kolme viimeistä suoritettiin erikoisbensiinillä puhdistetulla kiskolla. [6]



Kuva 10 Pysäyttävä raiteensulku, 2. prototyyppi [6]

Työntökokeessa pysäytinkengän kumivulkanoinnista irtosi paloja (Kuva 11). Tämän takia työntökokeita ei jatkettu pidemmälle. Kaikki vauriokohdat olivat kumin epäjatkuvuuskohdissa, joten jatkossa kumi on pyrittävä valmistamaan yhtenäiseksi.



Kuva 11 Pysäytinkengän pohja työntökokeiden jälkeen [6]

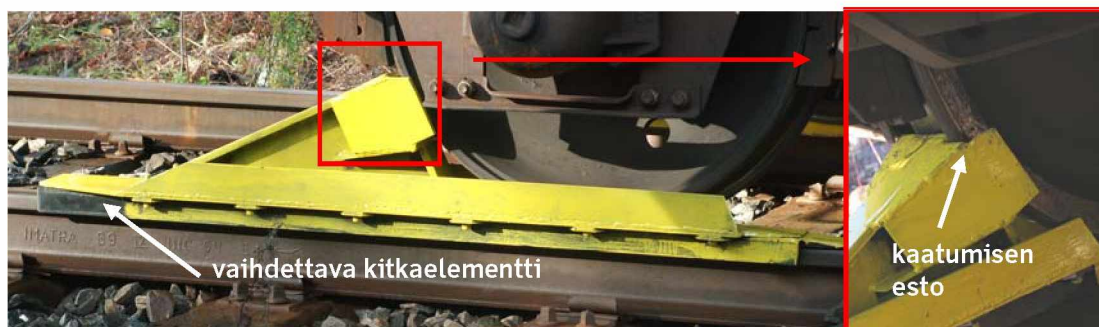
Kaikkien kokeiden pysäytysmatkat olivat alle 10 m, joten laite toimi hyvin (Taulukko 6). Suurimmalla nopeudella 12,5 km/h liikkuvan kaluston pysäytysmatka oli 7,01 m. Koetulosten hajontaan verrattuna kiskon puhdistaminen ei vaikuttanut pysäytysmatkaan. Pysäytysmatkojen avulla laskettu liukukitkakertoimien keskiarvo 1,20 on yli kaksinkertainen verrattuna huhtikuussa 2006 tehtyjen pysäytyskokeiden liukukitkakertoimen keskiarvoon (Kappale 2.1.3). Tämä tukee teoriaa ja laboratoriokokeiden tuloksia, joiden mukaan liukukitkakerroin kasvaa kosketuspaineen alentuessa (Kaava 1 ja Kaava 13).

Taulukko 6 Pysäytysmatka ja laskennallinen liukukitkakerroin eri törmäysnopeuksilla [6]

Koe	Nopeus (km/h)	Pysäytysmatka (m)	Liukukitkakerroin
1	5,2	0,90	1,46
2	7,6	2,51	1,11
3	10,1	3,91	1,25
4	10,7	4,83	1,14
5	12,5	7,01	1,08
6	5,0	0,94	1,28
7	7,7	2,44	1,17
8	10,0	4,44	1,09

2.1.6 Kenttäkoe 10/2006

Seuraavat pysäyttävän raiteensulun kenttäkokeet suoritettiin 18.10.2006 Toijalana ja Valkeakosken välisellä rataosuudella Konhossa. Kenttäkokeissa käytettiin edelleen paranneltua prototyyppiä (Kuva 12). Kyseinen prototyyppi muodostuu kahdesta osasta. Alaosa, kitkaelementti, on valmistettu UNP 100 -teräsprofiilista, jonka sisäpintaan on vulkanoitu noin 10 mm paksu erikoiskumikerros. Kitkaelementin takapää on viistetty, jotta liikkuvan kaluston ensimmäinen pyöräkerta pääsee nousemaan esteettömästi pysäytinkengän päälle. Törmäysvoiman vastaanottava pysäytinkengän yläosa on valmistettu hitsatuista teräslevyistä. Yläosaan on valmistettu pyörän profiilin muotoinen ura, joka vähentää pysäytinkengän kaatumisen riskiä. Pysäytinkengän ylä- ja alaosa kiinnitetään toisiinsa kitkaruuveilla. Tämän prototyypin etuna on vaihdettava kitkaelementti, joka alentaa pysäyttävän raiteensulun kunnossapitokustannuksia, koska kumin käyttöiän täytyttyä voidaan uusia pelkkä kitkaelementti.



Kuva 12 Pysäyttävä raiteensulku, 3. prototyyppi [8]

Kenttäkokeiden tarkoituksena oli testata uutta prototyyppiä raskaammalla kuormalla. Kokeissa käytettiin kolmea eri kalustokokoonpanoa. Ensimmäisessä koesarjassa (kokeet 1–5) liikkuva kalusto koostui kahdesta Dv12-veturista, yhdeksästä kuormatusta neliakselisesta tavaravaunusta ja yhdestä tyhjästä kaksiakselisesta tavaravaunusta, joka törmäsi pysäyttävään raiteensulkuun. Liikkuvan kaluston kokonaispaino oli 517 tonnia ja törmäävän vaunun akselipaino 60 kN. Toisessa koesarjassa (kokeet 6–8) käytettiin raskaampaa kalustoa, joka koostui kahdesta Dv12-veturista, 30 kuormatusta neliakselisesta tavaravaunusta ja yhdestä tyhjästä kaksiakselisesta tavaravaunusta, joka törmäsi pysäyttävään raiteensulkuun. Liikkuvan kaluston kokonaispaino oli 1378 tonnia ja törmäävän vaunun akselipaino 60 kN. Kolmannen koesarjan kalustokokoonpano (kokeet 9–11) oli muuten samanlainen kuin toisessa koesarjassa, mutta ilman edessä olevaa tyhjää vaunua. Liikkuvan kaluston kokonaispaino oli 1366 tonnia ja törmäävän vaunun akselipaino 100 kN. Liikkuvan kaluston törmäysnopeus määritettiin vbox-laitteella, joka perustuu satelliittien antamiin paikkatietoihin. [8]

Konhon kenttäkokeista saatiin seuraavan taulukon mukaiset tulokset (Kuva 7). Kokeiden pysäytysmatkat vaihtelivat törmäysnopeuden ja kaluston kokonaispainon mukaan muutamasta metristä kymmeneen metreiin. Taulukossa on esitetty myös pysäytysmatkojen avulla lasketut liukukitkakertoimet. Liukukitkakertoimen arvojen vaihteluväli on suurehko 0,91–1,71. Suurin liukukitkakertoimen arvo 1,71 saadaan kevyellä 60 kN akselipainolla ja toiseksi pienimmällä törmäysnopeudella, mikä on melko odotettua. Teorian mukaan liukukitkakerroin laskee kosketuspaineen noustessa, mutta tätä ei ole tuloksista havaittavissa. Liikkuvan kaluston kokonaispainon kasvulla on selvä pysäytysmatkaa lisäävä vaikutus. Akselipainon vaikutus pysähtymismatkoihin on myös odotettu. Akselipainon kasvu lisää kitkavoimaa ja siten pysähtymismatka lyhenee, vaikka liukukitkakerroin onkin alhaisempi. Akselipainon nousun tuoma lisäys kitkavoimaan on siis suurempi kuin liukukitkakertoimen laskun aiheuttama vähenemä.

Taulukko 7 Pysäytysmatka ja laskennallinen liukukitkakerroin eri törmäysnopeuksilla ja eri kalustokokoonpanoilla [8]

Koe	Nopeus (km/h)	Pysäytysmatka (m)	Liukukitkakerroin
Kaluston kokonaispaino 517 t, törmäävän vaunun akselipaino 60 kN			
1	2,3	1,59	0,94
2	5,5	7,77	1,05
3	6,5	12,00	1,02
4	9,0	24,51	0,95
5	10,5	34,67	0,91
Kaluston kokonaispaino 1378 t, törmäävän vaunun akselipaino 60 kN			
6	3,08	4,62	1,71
7	5,53	25,98	1,07
8	8,18	66,22	0,92
Kaluston kokonaispaino 1366 t, törmäävän vaunun akselipaino 100 kN			
9	3,24	5,01	1,11
10	6,79	19,17	1,25
11	9,47	50,10	0,95

2.1.7 Vierintäkokeet

Konhon kenttäkokeissa 18.10.2006 tarkasteltiin liikkuvan kaluston vierintävastuserointia kahdella liikkuvan kaluston kokoonpanolla. Kokeet suoritettiin siten, että kalusto kiihdytettiin sovittuun nopeuteen, kaluston annettiin vieriä, kunnes se pysähtyy, ja vierintämatka mitattiin mittapyörällä. Ensimmäisen vierintäkokeen kalusto koostui kahdesta Dv12-veturista, yhdeksästä kuormatusta neliakselisesta tavaravaunusta ja yhdestä tyhjästä kaksiakselisesta tavaravaunusta. Tällä kokoonpanolla vierintävastuskertoimeksi saatiin 0,0026. Toisessa vierintäkokeessa käytettiin liikkuvaa kalustoa, joka koostui kahdesta Dv12-veturista, 30 kuormatusta neliakselisesta tavaravaunusta ja yhdestä tyhjästä kaksiakselisesta tavaravaunusta. Tällä kokoonpanolla vierintävastuskertoimeksi saatiin 0,0025. Vierintäkokeiden perusteella Teknillisen korkeakoulun Rakenteiden mekaniikan laboratorion laskuissa vierintävastuskertoimen arvona on käytetty 0,0025. [8]

Junan vierimistä tutkittiin vierintäkokeilla vuoden 2007 keväällä. Kokeissa juna pysäytettiin sovittuun kohtaan ja päästettiin vapaasti vierimään. Vierintänopeutta ja -matkaa seurattiin junan mustalla laatikolla. Koepaikalla raiteen pituuskaltevuus oli vierintäsuuntaan -2,0 ‰. [9] Taulukko 8 esittää vierintäkokeiden tuloksia neljällä eri yksiköllä. Taulukosta nähdään, että noin 200 m matkalla, kun raiteen pituuskaltevuus on -2,0 ‰, kalusto saavuttaa noin 5 km/h nopeuden. Vierintävastuskertoimet saadaan selville kaavan 8 avulla. Vierintävastuskertoimien keskiarvo on 0,00144. Tämä eroaa selvästi Konhon vierintäkokeiden vierintävastuskertoimista. Syy saattaa olla herkästi vierivässä kalustossa tai epätarkassa nopeuden mittaamisessa. Tässä laskentamallissa liikkuvan kaluston kokonaispaino ei vaikuta vierintävastuskertoimeen. Alla olevan taulukon tulokset tukevat tätä teoriaa. Tarkempi teoreettinen laskentamalli ei toisi tuloksiin lisäarvoa, sillä nopeuksien mittauserätarkkuus on niin suuri.

Taulukko 8 Vierintäkokeiden tulokset [9]

Pituus (m)	Paino (t)	Vierintämatka (m)	Nopeus (km/h)	Vierintävastus- kerroin
434	1146	95	4	0,00134
314	605	235	5	0,00158
335	667	201	6	0,00130
541	1037	140	4	0,00155

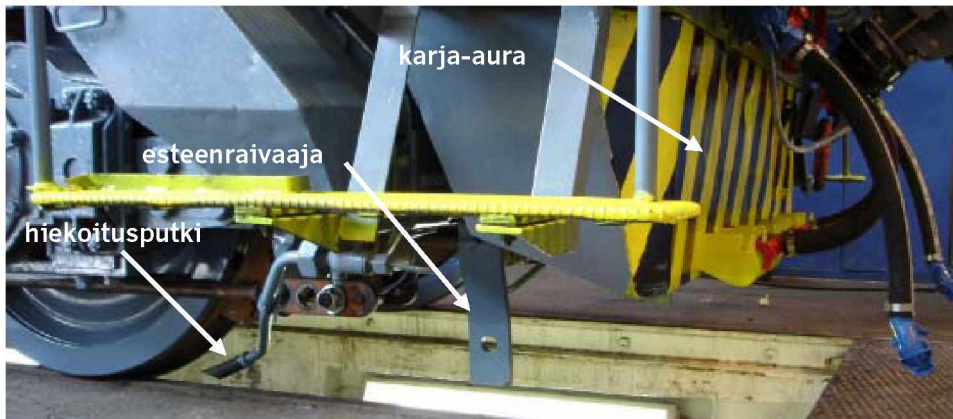
2.1.8 Kalustoselvitys

Aiemmin tehdyissä kenttäkokeissa huomattiin, että pysäytinkien korkeus on oltava mahdollisimman alhainen, jotta se soveltuu mahdollisimman monelle erityyppiselle kalustolle. Vuonna 2007 Ratahallintokeskus tilasi VR Engineeringiltä pysäyttävän raiteensulun soveltuvuus selvityksen. Selvityksen tavoitteena oli tutkia, mille VR:n eri kalustotyypeille pysäyttävä raiteensulku soveltuu. Soveltuvuuden rajat määriteltiin seuraavasti:

- soveltuu aiheuttamatta vaurioita
- soveltuu aiheuttaen kalustolle jonkin asteisia rakennevaurioita
- ei sovellu lainkaan.

Soveltuvuuden selvittämiseksi tutkittiin VR:n liikkuvan kaluston uloimman akselin edessä olevia rakenteita, jotka voisivat estää pysäyttävän raiteensulun oikean toiminnan. Rajoittava rakenne voi olla liian alas ulottuva teli, pyöräkerran tai päädyn

alustan osa, kuten telin kehys, jarrutönkkä, letkujen ripustin, vetokalustossa päädyn puskinlevy, esteenraivaaja ja hiekoituslaite (Kuva 13). Näiden osien korkeuteen raiteen pinnasta vaikuttaa myös pyörien kuluneisuus. Pyörien kuluneisuus otettiin selvityksessä huomioon ja kaikki tulokset on ilmoitettu tilanteen mukaan, jossa pyörät ovat käyttöräjällä. Hajontaa mittauksiin aiheutti kaluston jousien painuminen, joten mittauksia tehtiin useammasta samantyyppisestä kalustoyksilöstä. Ratatyökoneiden soveltuvuutta ei kalustaselvityksessä tutkittu. [10]



Kuva 13 Dv12 veturin etummainen akseli [10]

Taulukko 9 (sivu 21) esittää kalustaselvityksen mittaustuloksia. Taulukossa on esitetty kalustoluokittain pysäyttävän raiteensulun käyttöä rajoittavat rakenteet sekä niiden korkeudet millimetreinä kiskon selän korkeudesta mitattuna. Tavaravaunujen suuren määrän takia tavaravaunut on luokiteltu telin mukaan. Mittaukset on suoritettu tyhjällä kalustolla, joten jousien painumisen takia voi esiintyä pienempiäkin arvoja. Pysäyttävän raiteensulun kolmannen prototyypin korkeus 294 mm on liian korkea. Selvitys ehdottaa pysäyttävän raiteensulun korkeuden pienentämistä 200 mm:iin, mieluiten 180 mm:iin. Jos pysäyttävän raiteensulun korkeus olisi 200 mm, soveltuisi se vauriota aiheuttamatta mitatulle henkilövaunukalustolle ja lähes kaikille tavaravaunuille. Vetokaluston pysäyttämiseen pysäyttävä raiteensulku ei sovellu. Moottorijunista pysäyttävä raiteensulku soveltuu Sm3-kaluston (Pendolino) pysäyttämiseen. Kalustonselvitys ehdottaa erikseen kummallekin kiskolle asennettavien pysäytinkien yhdistämistä vaakasitein. [10] Vaakasiteiden käyttö hankaloittaa kuitenkin kääntömekanismin toteuttamista, joten pysäytinkengät pidettiin jatkossakin erillisinä.

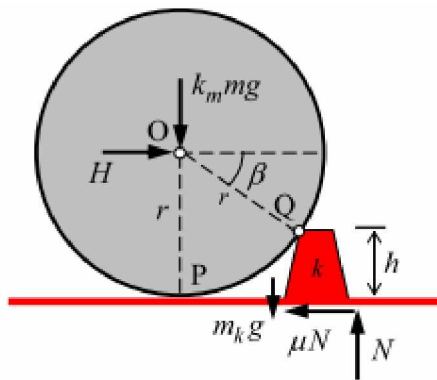
Dieselveturit Dv12, Dv16 ja Dr16 sekä ratakuorma-auto Tka7 on mahdollista muokata sopiviksi pysäyttävälle raiteensululle poistamalla esteenraivaajat. Esteenraivaajien poistaminen ei ole välttämättä järkevä, sillä ne ovat tarpeellisia ratatöissä. Sm5 (FLIRT) on uusi sähkömoottorijunayksikkö, joka tulee korvaamaan pääkaupunkiseudun lähiliikenteessä Sm1- ja Sm2-junat. Sm5-juna soveltuu keulaspoilerin korkeuden puolesta pysäytettäväksi pysäyttävällä raiteensululla, mutta mahdollisia ongelmia aiheuttaa hiekoituslaitteisto [11]. Sm5-junien soveltuvuutta pitäisi tutkia vastaavilla mittauksilla, jotta mahdollinen soveltuvuus saataisiin selville. Samalla voisi selvittää 12.12.2010 Helsingin ja Pietarin välillä liikennöin aloittaneen Sm6-junan (Allegro) soveltuvuus.

Taulukko 9 Kalustorajoitteiden korkeudet kiskon selän korkeudesta [10]

Vetokalusto									
	Sr1	Sr2	Dv12	Dv16	Dr14	Dr16	Tve4	Tve5	Tka7
karja-aura	165	125	245	250	175	245	200	150	315
hiekoitusputki	75	35			80				
jarruvivusto	135								
esteenraivaaja			60	80	90	40			50
Moottorijunat, Sm/Dm-junakalusto									
	Sm1	Sm2	Sm3	Sm4	Dm12				
karja-aura	150	165			105				
keulaspoileri			235	180					
Henkilövaunut, pikajunavaunut									
	Eit, Ei, Ein, Eip, Ept, Eifet, Eil, Cemt,						A17	A12	
	Rkt, Rbkt, Nom, A16, A40, A60								
jarruletkun ripustin	230						350	350	
Henkilövaunut, 1-kerros IC									
	Ex	Rx	Expt						
jarruletkun ripustin	350	350	350						
Henkilövaunut, 2-kerros IC									
	Ed	Edfs	Edb	Edm					
telin päätypalkki	230	230	230	230					
Tavaravaunut									
	K14	K16	K17	VR 130R		VR 22,5 t			
telin kehys	480	320							
jarrutönkkä	230	220		200		195			

2.1.9 Pysäytinkengän minimikorkeus 11/2007

Kalustoselvitys ehdottaa pysäytinkengän korkeuden alentamista 200 mm:iin tai mieluiten 180 mm:iin. Ehdotuksen perusteella Teknillisen korkeakoulun Rakenteiden mekaniikan laboratorio tutki teoreettisesti pysäytinkengän minimikorkeutta. Pysäytinkengälle ja törmäävälle pyöräkerralle saadaan seuraava vapaakappalekuva (Kuva 14).



Kuva 14 Vapaakappalekuva pysäytinkengästä ja pyöräkerrasta [12]

Pyörän ja pysäytinkengän muodostaman systeemin vapaakappalekuvan perusteella minimikorkeudelle saadaan seuraava kaava.

$$h_{kr} = r \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2 \left(1 + \frac{m_k}{km} \right)^2}} \right], \quad (2)$$

jossa r on pyörän säde
 μ on liukukitkakerroin
 m_k on pysäyttävän raiteensulun massa
 k on akselipainon korjauskerroin (Kaava 14)
 m on akselipaino (kg).

Kaavan perusteella voidaan laskea pysäytinkengän minimikorkeus erilaisilla liukukitkakertoimen arvoilla (Taulukko 10). Liukukitkakertoimen kasvaessa kasvaa myös pysäytinkengän minimikorkeus. Pyörän törmäämistä pysäytinkengään tutkittiin myös tarkemmilla kinemaattisilla malleilla. Tarkastelussa todettiin minimikorkeuden laskukaavan olevan varsin toimiva. Taulukossa 11 esitetyjen pysäytyksien, joiden törmäysnopeus oli yli 5 km/h, liukukitkakertoimien keskiarvo on 1,39. Tällä liukukitkakertoimella pysäyttävän raiteensulun minimikorkeudeksi saadaan laskentamallin avulla 202 mm. [12]

Taulukko 10 Pysäytinkengän minimikorkeudet eri liukukitkakertoimen arvoilla [12]

Liukukitkakerroin	Akselipainon korjauskerroin	Minimikorkeus (mm)
0,8	1,11	106
1,0	1,15	142
1,2	1,18	174
1,4	1,22	202
1,6	1,26	227

Pysäytinkengän minimikorkeutta tutkittiin myös kenttäkokeilla Lielahdessa 2.7.2007. Kokeita varten pysäyttävästä raiteensulusta valmistettiin kolmannen prototyypin b-revisio, jossa törmäyspalan korkeutta voitiin muuttaa. Tarkoituksena oli löytää korkeus, jolla törmäävän kaluston pyörä ei nousisi ilmaan pysäytinkengän pinnasta. Pyörän nousun havaitsemiseksi kokeet kuvattiin suurnopeuskameralla. Lisäksi törmäyspalaan kiinnitettiin teippi, jonka jäljistä voitiin havaita mahdollinen pyörän nousu. Kokeiden kalusto koostui Dv12-veturista ja tyhjästä Hkb-avotavaravaunusta.

Kaluston kokonaispaino oli 80,5 t ja törmäävään pyöräkerran akselipaino 62,5 kN. Kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 11. 180 mm korkeudella pyörä pyrki nousemaan pysäyttävän raiteensulun ylitse, joten kokeita ei jatkettu. 200 mm korkeudella suurnopeuskuvista havaittiin pyörän nousu, mutta se ei estänyt törmäyskokeiden suorittamisia. [12]

Taulukko 11 Minimikorkeuden määrittäminen kenttäkokeiden perusteella [12]

Tavoite nopeus (km/h)	Aika (s)	Mitattu nopeus (km/h)	Pysäytysmatka (m)	Liuku- kitka- kerroin	Kommentti törmäyksestä
Vaihe 1: $h = 240$ mm					
2	7,6	2,4	0,50	0,96	Pyörän nousua ei havaittu
5	3,8	4,7	1,37	1,33	
8	2,3	7,8	7,19	0,75	
Vaihe 2: $h = 220$ mm					
2	7,7	2,3	0,15	2,46	Pyörän nousua ei havaittu
5	2,1	8,6	3,46	1,64	
Vaihe 3: $h = 200$ mm					
2	5,0	3,6	0,66	1,54	Pyörän nousua havaittiin
5	3,1	5,8	2,11	1,29	
Vaihe 4: $h = 180$ mm					
törmäyskokeita ei tehty				Pyörä pyrki pysäytinkengän yli	
Vaihe 5: $h = 200$ mm					
2	6,4	2,8	0,29	1,98	Pyörän nousua havaittiin
5	3,6	5,0	1,58	1,29	
8	2,5	7,2	5,37	0,84	

Teoreettisten tarkastelujen ja kenttäkokeiden tulosten perusteella pysäyttävän raiteensulun pysäytinkengän minimikorkeus on 200 mm. Koska tarkasteluun liittyy epävarmuustekijöitä, raportti ehdottaa pysäytinkengän korkeudeksi 220–230 mm. [12]

2.1.10 Kenttäkoe 9/2008

Pysäytinkien kiinnittämistä tutkittiin Tampereella Lielahden ratapihalla 17.9.2008. Kenttäkokeen tarkoituksena oli tutkia, minkä paksuiset ruuvit soveltuvat parhaiten pysäytinkien kiinnittämiseksi kääntömekanismiin. Kokeita varten kiskoihin oli porattu sidekiskojen kiinnitysreiät. Kiinnitysreikien asemointi ei ollut täysin tarkka, minkä johdosta kulkusuuntaan nähden vasemman puoleinen pysäytinkenkä osui ensiksi törmäävän kaluston pyöräkertaan. Kumpikin pysäytinkenkä kiinnitettiin kolmella ruuvilla levyyn, joka oli kiinnitetty sidekiskoon (Kuva 15).



Kuva 15 Koelaitteisto kiinnitysruuvien koon selvittämiseen [13]

Kokeissa pysäytinkengän kiinnitykseen käytettiin kolmea teräsruuvia, joiden halkaisijat olivat 8 mm tai 10 mm ja joiden lujuusluokka oli 8.8. Ruuvien lujuusluokat määritellään standardissa ISO 898. Lujuusluokan 8.8. ruuvien myötölujuus on 640 N/mm^2 ja murtolujuus 800 N/mm^2 [14]. Törmäävänä kalustona käytettiin tyhjää kaksiakselistä Hkb-avotavaravaunua yksin tai yhdessä Tka8-ratakuorma-auton kanssa. Törmäävän kaluston akselipaino oli 62,5 kN ja kaluston kokonaispaino 12,5 t tai 47,5 t. **Taulukko 12** esittää kenttäkokeiden havaintoja. [13]

Taulukko 12 Havainnot ruuvien kestosta törmäyskokeessa [13]

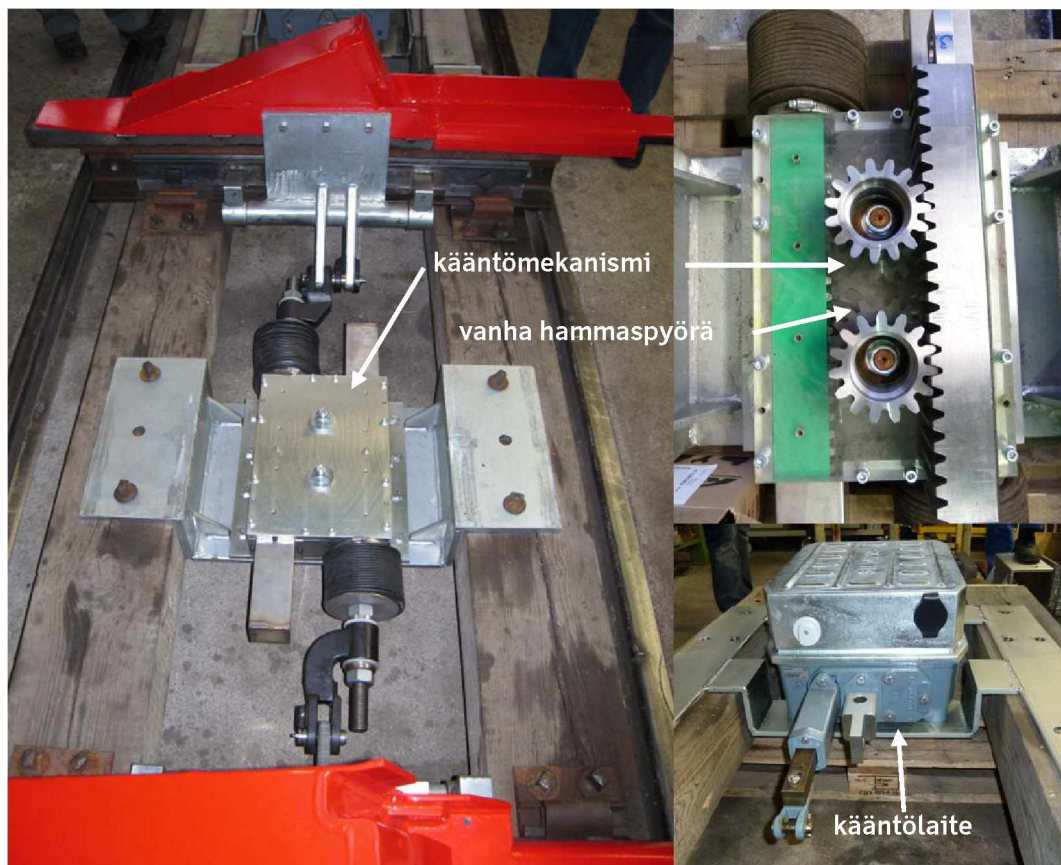
Koe	Kalusto	Ruuvien halkaisija (mm)	Törmäysnopeus (km/h)	Kitkaele-menttien kunto	Havainnot
1	Tka8+Hkb	8	4,3	vanha	kaikki ruuvit poikki
2	Hkb	10	3,9	vanha	vasemmasta pysäytin-kengästä ruuvit poikki
3	Hkb	8	2,2	uusi	vaunu nousi vain hieman pysäytinkengien päälle
4	Hkb	8	4,0	uusi	kaikki ruuvit poikki
5	Hkb	10	7,2	uusi	kaikki ruuvit poikki
6	Tka8+Hkb	10	12,6	vanha	kaikki ruuvit poikki, kalusto liukui 4,9 m

Tuloksista huomataan pysäytinkengien irtoavan kääntölaitteesta sekä 8 mm että 10 mm ruuveilla. Ruuvien katkeaminen riippuu kaluston kokonaispainon ja törmäysnopeuden lisäksi myös törmäävän kaluston akselipainosta, sillä kääntölaite jättää pysäytinkengät hieman irti kiskoista, mikä lisää ruuveille kohdistuvaa leikkausvoimaa. Kokeiden perusteella päätetään pysäytinkengä kiinnittää kääntömekanismiin kolmella M10 ruuvilla. [13] Tällöin pysäytinkengien ruuvien murtumiseen vaaditaan 380 kN voima, joten kaluston akselipaino ei murra ruuveja.

2.1.11 Kääntömekanismin kehitys

Aukean tilan ulottuma on se raiteen tila, jonka sisällä ei saa olla kiinteitä rakenteita eikä laitteita [15]. Tämä ehto ohjasi vahvasti pysäyttävän raiteensulun kääntömekanismin suunnittelua. Kääntömekanismin suunnittelun lähtökohdaksi valittiin kääntövoiman tuottaminen Siemens S 700 K -kääntölaitteella. Kyseistä kääntölaitea käytetään Suomessa raiteensulkujen kääntämiseen, joten laitteen toiminta ja huolto on tuttua. Varsinaisen kääntömekanismin suunnittelun lähtökohdaksi valittiin kaksoisraiteensulusta tuttu mekaniikka, jossa kummatkin pysäytinkengät kääntyvät

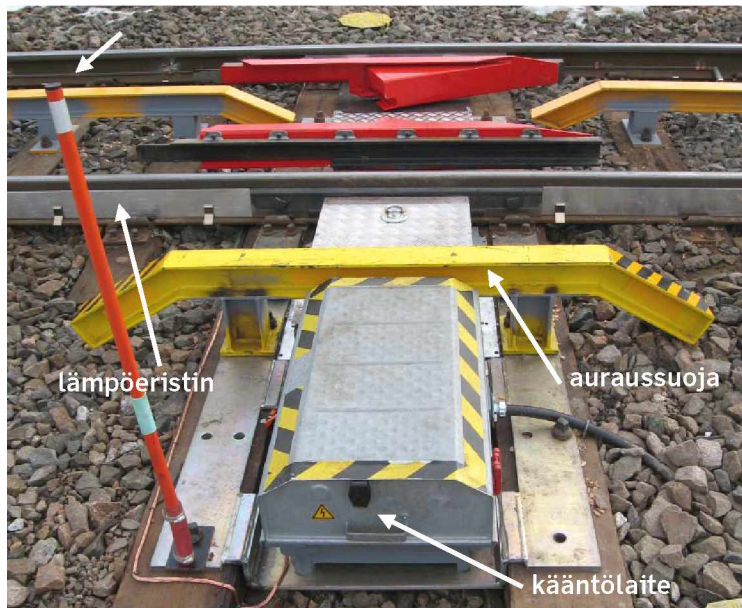
saamaan suuntaan: toinen kääntyy kiskon ulkopuolelta ja toinen kiskojen välistä. Kiskon ulkopuolelta kääntyvä pysäytinkengä ei mahtunut aukean tilan ulottuman ulkopuolelle, joten idea hylättiin. Seuraava ehdotus oli rakentaa mekanismi, jossa kummatkin pysäytinkengät kääntyvät kiskojen välistä. Mekanismi toteutettiin kääntövipujen avulla. Vipumekanismin toimintaa kokeiltiin mekaanisessa rasitus-testissä, jossa kolmen kuukauden koejakson aikana suoritettiin noin 12 000 kääntöä. [16] Ratapölkkyväli on Suomessa pölkkyjen keskiviivasta mitattuna 610 ± 20 mm [17]. Vipumekanismilla toimiva kääntömekanismi kasvatti pölkkyvälin 1000 mm:iin, joka aiheutti kiskolle liian suuren taipuman. Kääntömekanismista kehitettiin uusi versio, joka perustui hammastankoihin ja hammaspyöriin. Hammastankomallisen kääntömekanismin avulla pölkkyväli saatiin kavennettua 800 mm:iin. 250 kN akselipainolla 800 mm pölkkyväli kasvattaa kiskon taivutusjännitystä 8 %, verrattuna 600 mm pölkkyväliin [18]. Tämä jännityksen kasvu hyväksyttiin ja kääntömekanismista päätettiin rakentaa koelaitte (Kuva 16). Kääntömekanismin hammaspyörien halkaisijaa pienennettiin vuonna 2010 ja näin pölkkyväli saatiin alle 800 millimetrin. Kuvan 16 oikeassa yläkulmassa on alla vanhat hammaspyörät ja päällä uudet halkaisijaltaan pienemmät hammaspyörät. Pysäyttävän raiteensulun kääntömekanismin on suunnitellut ja valmistanut Konepaja Mankinen Oy. Pysäyttävässä raiteensulussa on asennonvalvonta, jonka perusteella saadaan tietää, ovatko pysäytinkengät kiskoilla, poissa kiskoilta vai onko laite vikatilassa. Vikatilailmoitus tulee, kun kalusto törmää pysäyttävään raiteensulkuun. [19]



Kuva 16 Kääntömekanismin hammastankomalli ja Siemens S 700 K -kääntölaite

2.1.12 Pysäyttävän raiteensulun koekäyttö Riihimäen ratapihalla

Pysäyttävä raiteensulku otettiin ensimmäisen kerran koekäyttöön 12.5.2009 Riihimäen ratapihalla (Kuva 17). Pysäyttävä raiteensulku on asetinlaitteen ohjauksessa raiteella 088, raideopastimen Ue88 eteläpuolella, ennen vaihdetta V031. Pysäyttävä raiteensulku on kiinnitetty sähkömekaaniseen Siemens S 700 K -kääntölaitteeseen. Kiskot pidetään pysäyttävän raiteensulun kohdalta talvisin sulana kahdella 1700 W vaihteenlämmitysvastuksella ja yhdellä 600 W tankokuoppalämmittimellä.



Kuva 17 Riihimäen pysäyttävä raiteensulku [20]

9.6.2010 Riihimäen ratapihalla Shimmn teräskelavaunu putosi kiskoilta törmättyään pysäyttävään raiteensulkuun. Yksikkö oli liikkunut raidetta 088 pitkin ja törmännyt raiteella olleeseen pysäyttävään raiteensulkuun väärästä suunnasta. Tapahtumassa vauhti oli hiljainen eikä suistuminen aiheuttanut raiteelle tai kalustolle vaurioita. [21] Tapahtuneen johdosta Riihimäen ratapihalle tilattiin Konepaja Mankiselta kaksisuuntainen raiteensulku. Uusi kaksisuuntainen raiteensulku asennettiin samaan paikkaan loppukesästä 2010.

Riihimäen ratapihalla koekäytössä olevasta pysäyttävästä raiteensulusta on saatu hyödyllistä informaatiota. Laite on kääntynyt yhden erittäin runsaslumisen talven aikana kiskoille useita satoja kertoja ilman minkäänlaisia ongelmia, joten pysäyttävän raiteensulun käännön voidaan sanoa olevan toimintavarma. 8.12.2010 mennessä Riihimäen pysäyttävä raiteensulku oli kääntynyt kiskoille yhteensä 1924 kertaa. Suistumistapaus vei myös osaltaan tuotekehitystä eteenpäin. Kaksisuuntaisen raiteensulun kehittämisen lisäksi tapaus nosti esille kaksitoimisen raiteensulun, joka suistaa varmuudella toisesta suunnasta, mutta pysäyttää toisesta suunnasta.

2.1.13 Kenttäkoe 5/2010

4.1.2010 sattui Helsingissä onnettomuus, jossa neljä kaksikerroksista InterCity-vaunua irtosi junan rungosta Linnunlaulun kohdalla lähtien vierimään kohti päärautatieasemaa. Vaunut ohjattiin tyhjänä olleelle raiteelle numero 013. Vaunujen nopeus oli ennen törmäystä noin 30 km/h. Ensimmäinen vaunu nousi törmäyksessä rikkoutuneen raidepuskimen päälle ja edelleen raiteen päässä olevan betoniesteen

päälle törmäten lopulta raiteen päässä olevan toimistorakennuksen seinään. Onnettomuudessa ei aiheutunut henkilövahinkoja, mutta aineelliset vahingot olivat noin 2 miljoonaa euroa. [22]

Helsingissä tapahtuneen onnettomuuden johdosta järjestettiin 11.5.2010 Porin Mäntyluodossa raiteella 935 kenttäkokeet, joiden tarkoituksena oli selvittää pysäyttävän raiteensulun toiminta vastaavassa tilanteessa. Tätä ennen pysäyttävän raiteensulun toimintaa ei ollut testattu yhtä suurilla nopeuksilla. Mäntyluodon pysäytyskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 13. Koepaikan raiteen pituuskaltevuus on liikkeen suuntaan -6,8 ‰. Ensimmäisessä vaiheessa kalustona oli Dv12-veturi, neljä Tabkk-keräyspaperivaunua ja yksi Elo-t-irtotavaravaunu. Törmäävän pyöräkerran akselipaino oli 73 kN ja liikkuvan kaluston kokonaispaino 207,3 tonnia. 35 km/h nopeudesta kalusto pysähtyi 218,9 metrin matkalla. Seuraavassa vaiheessa kaluston kokoonpanoon lisättiin neljä Tabkk-keräyspaperivaunua. Törmäävä vaunu pysyi samana, mutta kaluston kokonaispaino kasvoi 332,1 tonniin. Tämä kalusto pysähtyi 328,7 metrin matkalla nopeudesta 35 km/h. Viimeiset kokeet suoritettiin muuten samalla kalustolla, mutta tyhjä kaksiakselinen Elo-t-irtotavaravaunu poistettiin. Viimeisessä vaiheessa törmäävän pyöräkerran akselipaino oli 78,5 kN ja liikkuvan kaluston kokonaispaino 317,3 tonnia. Tämä kalusto pysähtyi 241,5 metrin matkalla nopeudesta 35 km/h. [23]

Taulukko 13 Mäntyluodon kenttäkokeiden tulokset [23]

Koe	Nopeus (km/h)	Pysäytysmatka (m)	Liukukitkakerroin
Kaluston kokonaispaino 207,3 t; törmäävän vaunun akselipaino 73 kN			
1	15	35,4	0,79
2	20	64,2	0,77
3	25	97,1	0,79
4	30	134,0	0,82
5	35	218,9	0,71
Kaluston kokonaispaino 332,1 t; törmäävän vaunun akselipaino 73 kN			
6	20	87,0	0,95
7	35	328,7	0,82
Kaluston kokonaispaino 317,3 t; törmäävän vaunun akselipaino 78,5 kN			
8	20	72,9	1,02
9	34	239,0	0,93
10	35	241,5	0,96

Tuloksista havaitaan pysäyttävän raiteensulun pysäytysmatkojen olevan kohtuullisia. Helsingissä 4.1.2010 sattuneessa onnettomuudessa vaunujen arvioitu törmäysnopeus oli 25–30 km/h, törmäävän pyöräkerran akselipaino 127,5 kN ja kaluston kokonaispaino 204 tonnia [22]. Onnettomuuskaluston pysäyttäminen pysäyttävällä raiteensululla nopeudesta 30 km/h olisi vaatinut matkaa noin 100 m keskimääräisen liukukitkakertoimen arvolla 0,5. Mäntyluodon kokeiden perusteella voidaan todeta, että oikein sijoitettu pysäyttävä raiteensulku olisi estänyt Helsingissä 4.1.2010 tapahtuneen onnettomuuden, jos pysäytinkengät olisi ehditty kääntää kiskoille.

Pysäyttävä raiteensulku toimi Mäntyluodon kenttäkokeissa odotetusti. Kitkaelementti kiinnitettiin pysäytinkenkään kymmenellä M12 ruuvilla, joiden lujuusluokka oli 8.8. Kitkaelementin kiinnitysruuvien korvakkeiden väärän asemoinnin takia törmäysenergia kohdistui olakkeen sijasta ruuveille (Kuva 18). Törmäyksen aiheuttama leikkausvoima oli liian suuri ja osa ruuveista leikkautui poikki. Tämän takia pysäyttävän raiteensulun rakennetta on muutettava siten, että kitkaelementtien kiinnitysruuveille ei kohdistu törmäyksessä leikkausvoimaa, vaan ruuvien tehtävä on ainoastaan vetää kitkaelementti ja pysäytinkengän yläosa yhteen. Törmäyksen leikkausvoima on otettava vastaan olakkeella.



Kuva 18 Pysäyttävän raiteensulun, 4. prototyyppi

2.1.14 Kustannusvertailu

Majajärven liikennepaikan turvavaihteen V004 modernisoinnista tehtiin vuonna 2010 kustannusvertailu, jossa vanhan vaihteen korvaajana käytettiin uutta turvavaihdetta tai vastaavasti pysäyttävää raiteensulkua. Majajärven liikennepaikan raiteistokaavio on esitetty liitteen 1 kuvassa 1. Majajärvellä opastimen P002 ja pääraiteen vaihteen V002 rajamerkin välinen matka on 140 metriä, joten liikennepaikka soveltuu hyvin pysäyttävälle raiteensululle. Majajärven liikennepaikan raiteen pituuskaltevuus on pysäytyssuuntaan -2,0 ‰.

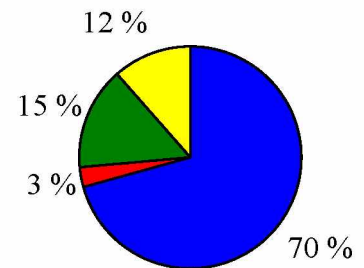
Kustannusvertailun ensimmäinen vaihtoehto oli uuden turvavaihteen vaihto nykyiselle paikalle. Turvavaihteen kustannusarvio sisälsi seuraavat rataan liittyvät raidetyöt: kiskojen katkaisu, vaihteen poisto, vanhan tukikerroksen poisto, tukikerros-materiaalin hankinta, uuden tukikerroksen teko, uuden vaihteen asennus, vaihteen koneellinen tukeminen ja oikominen, tukikerroksen muotoilu ja harjaus, raiteen jatkuvaksi hitsaaminen sekä ajolangan aseman tarkastus ja säätö. Uuden turvavaihteen kokonaiskustannukset ilman arvonlisäveroa ovat 170 000 €. Kustannukset jakaantuvat seuraavan kuvan mukaisesti. [24]

■ raidetyöt materiaaleineen 120 000 €

■ turvalaite- ja vahvavirtatyöt 5 000 €

■ työmaatehtävät (rakentaminen) 25 000 €

■ tilaajatehtävät (suunnittelu ja rakennuttaminen) 20 000 €



Kuva 19 Turvavaihteen kustannusten jakautuminen, kokonaiskustannus 170 000 €

Toisena sivusuojan antavana turvalaitevaihtoehtona tarkasteltiin selvityksessä pysäyttävää raiteensulkua. Turvavaihteen paikalle asennettavan pysäyttävän raiteensulun kustannusarvio sisälsi seuraavat rataan liittyvät raidetyöt: kiskojen katkaisu, vaihteen poisto, turvalaitteen ja raidepuskimen purku, vanhan tukikerroksen poisto, tukikerrosmateriaalin hankinta, uuden tukikerroksen teko, raidemateriaalin hankinta, raiteen asennus, raiteen koneellinen tukeminen ja oikominen, tukikerroksen muotoilu ja harjaus, raiteen jatkuvaksi hitsaus sekä ajolangan aseman tarkastus ja säätö. Lisäksi kustannusarvio sisälsi seuraavat turva- ja vahvavirtalaitteisiin liittyvät työt: ohjaus- ja lämmityskaapeleiden irrotus ja uudelleen asennus, laitteiden asennukset sekä tankojen säätö ja testaus. Pysäyttävän raiteensulun kokonaiskustannukset ilman arvonlisäveroa ovat noin 60 000 €. Tarkempi kustannusrakennearvio löytyy liitteen 1 taulukosta 1. Kustannukset jakaantuvat seuraavan kuvan mukaisesti. [24]

■ pysäyttävä raiteensulku 22 500 €

■ raidetyöt materiaaleineen 18 000 €

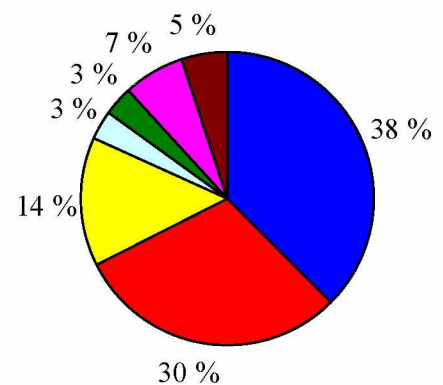
■ vaihteenkääntölaite 8 500 €

■ välitangot eristyksineen 2 000 €

■ turvalaite- ja vahvavirtatyöt 2 000 €

■ työmaatehtävät (rakentaminen) 4 000 €

■ tilaajatehtävät (suunnittelu ja rakennuttaminen) 3 000 €



Kuva 20 Pysäyttävän raiteensulun kustannusten jakautuminen, kokonaiskustannus 60 000 €

Kustannus selvityksen perusteella uuden turvavaihteen kokonaiskustannukset Majajärven liikennepaikalle ovat noin 170 000 €, kun taas pysäyttävä raiteensulun kokonaiskustannus on 60 000 €. Turvavaihteen hinta alenee 25 000 €, jos käytetään

kunnostettua kierrätysvaihdetta. Kustannusselvityksen perusteella Majajärven liikennepaikka soveltuisi hyvin pysäyttävän raiteensulun käyttöön. Selvityksen perusteella pysäyttävän raiteensulun käyttöä kannattaa harkita suojausta vaativilla liikennepaikoilla, joissa tarvitaan turvavaihteen uusimista ja joissa opastinvara on yli 100 metriä. Kustannusselvityksen hinnat ovat tapauskohtaisia, joten niitä ei voi yleistää.

2.1.15 Riskianalyysi

Kesäkuussa 2010 valmistui Liikenneviraston tilaama selvitys pysäyttävän raiteensulun toteuttamiseen liittyvistä turvallisuusriskeistä. Riskianalyysin menetelminä käytettiin potentiaalisten ongelmien analyysia, vikapuuanalyysia ja riskimatriisia. Potentiaalisten ongelmien analyysissä mahdolliset vaarat jaettiin seuraaviin riskiluokkiin:

- A = Jatkokäsittelyä edellyttävät vaarat (vastaa riskilukua 15–25)
- B = "Vanhat" ja luotettavasti hoidossa olevat vaarat (vastaa riskilukua 5–14)
- C = Vailla käytännön merkitystä olevat vaarat (vastaa riskilukua 1–4)

Riskimatriisissa arvioidaan haitallisuuden ja todennäköisyyden tulona vaarasta aiheutuva riski. Sekä haitallisuus että todennäköisyys arvioidaan luvulla 1–5, joten riskimatriisin riskiluvun arvot vaihtelevat välillä 1–25. Riskimatriisin riskiluvut määriteltiin seuraavasti:

- 1–4 Riski on hyväksyttävissä, ei välttämätöntä noudattaa ennakoivia toimenpiteitä.
- 5–14 Riski on hyväksyttävissä, kun ennakoivat toimenpiteet huomioidaan.
- 15–25 Riski ei ole hyväksyttävissä. Riskiä on vähennettävä. [25]

Liitteen 2 kuvassa 1 on esitetty pysäyttävän raiteensulun vikapuuanalyysi. Vikapuuanalyysistä nähdään eri riskien syyt ja seuraukset. Vikapuuanalyysin hyöty kasvaa käytön myötä kvantitatiivisen tiedon lisääntyessä. Vikataajuuksien ja riskien vaikuttavuuksien kertyessä, saadaan aikaan entistä tarkempi arvio riskien todennäköisyydestä, haitallisuudesta ja riskiluvusta. [25]

Liitteen 2 taulukossa 1 on esitetty potentiaaliset ongelmat ja niiden riskiluvut riskiluokkien A ja B osalta. Taulukon T-sarake tarkoittaa tapahtumisen todennäköisyyttä, H-sarake haitallisuutta, R-sarake riskilukua ($T \times H = R$) ja L-sarake riskiluokkaa. Taulukosta nousee esille kaksi A-luokan vaaraa, jotka edellyttävät jatkokäsittelyä. Suurin mahdollinen riskiluku 25 ja riskiluokka A, on tullut lumen aiheuttamista vaaroista. Toiseksi suurin riskiluku 15 ja riskiluokka A, on arvioitu tilanteella, jossa kalustolla on liian suuri liike-energia. Raportti ehdottaa pysäyttävälle raiteensululle lisää kenttäkokeita, jotta arvioituihin riskeihin osataan paremmin varautua. [25]

Riskianalyysi-raportin tuloksiin on helppo yhtyä. Lumen tuomia riskejä ei voi selvittää luotettavasti mitenkään muuten kuin talvella järjestettävillä kenttäkokeilla. Kenttäkokeita on tehtävä erilaisissa lumiolosuhteissa ja jäisillä keleillä, ennen kuin pysäyttävä raiteensulku voidaan ottaa laajemmin käyttöön. Liian suuren liike-energian aiheuttamaan riskiin on hankala varautua, sillä etukäteen ei ole tiedossa, minkälainen kalusto raiteensulkuun törmää. Riittävästä pysäytysmatkasta ei voi antaa yksittäistä yleisesti voimassa olevaa lukua, vaan pysäyttävän raiteensulun asennuspaikka on mitoitettava aina tapauskohtaisesti.

2.1.16 Kaksisuuntainen pysäytinkenkä

Kappaleessa 2.1.12 on selostettu tapahtuma, jossa liikkuva kalusto suistui raiteilta törmättyään pysäyttävään raiteensulkuun väärästä suunnasta. Tapahtuman johdosta Riihimäen ratapihan yksisuuntaiset pysäytinkengät poistettiin ja tilalle suunniteltiin kaksisuuntaiset pysäytinkengät. Uudet pysäytinkengät asennettiin takaisin samaan paikkaan syksyllä 2010 (Kuva 21). Kaksisuuntainen pysäytinkenkä on keskiosan suhteen symmetrinen. Pysäytinkengän suunnittelun ja valmistuksen on tehnyt Konepaja Mankinen Oy. Liitteessä 3 on esitetty kaksisuuntaisen pysäytinkengän kokoonpanopiirustus.

Vuonna 2005 tapahtui Tuupovaaran ratapihalla vaihtotyöonnettomuus, jossa puutavaravaunuista koostuva kalusto törmäsi raiteilla olleeseen raiteensulkuun. Tapaturmassa ensimmäinen pyöräkerta suistui kiskoilta ja vaihtotyönjohtaja putosi kulma-astimelta kiskojen väliin. Vaihtotyönjohtaja selvisi tapaturmasta hengissä, mutta hän loukkaantui vakavasti. [26]

Kaksisuuntaisen pysäytinkengän idea on estää edellä esitetyn kaltaiset onnettomuudet sekä mahdollistaa suojan antaminen kumpaakin suuntaan. Pysäytysmatka tulee olla riittävä molempiin suuntiin, jos pysäyttävällä raiteensululla on tarkoitus antaa kaksisuuntainen suoja. Kaksisuuntaisen pysäytinkengän valmistaminen ei lisää laitteen painoa, mutta alentaa hieman valmistuskustannuksia, joten pääsääntöisesti pysäyttävän raiteensulun pysäytinkenkä kannattaa valmistaa kaksisuuntaiseksi. Symmetrian ansiosta kaksisuuntaista pysäytinkenkää ei voi asentaa väärinpäin.

2.2 Tuotekehityskaaren yhteenveto

Vuonna 2005 alkanut Pysäyttävä raiteensulku -projekti on mennyt paljon eteenpäin, mutta peruskonstruktio on pysynyt samana. Kuva 21 esittää kuvina pysäyttävän raiteensulun kehityksen eri vaiheita.



Kuva 21 Tuotekehityskaari

Pysäyttävän raiteensulun kitkaelementin kumimateriaaliksi on valikoitunut Teknikum Oy:n valmistama TRL20, jolla hyvä kulutuskestävyys ja riittävä liukukitkakerroin. Kumi vulkanoidaan 1600 mm pitkään UNP 100 -teräsprofiliin ja kitkaelementti kiinnitetään ruuveilla varsinaiseen pysäytinkenkään. Kitkaelementin liukukitkakertoimen määrittäminen oli odotettua hankalampaa. Liukukitkakerroin riippuu lukuisista tekijöistä, eikä kaikkien tekijöiden vaikutusta saatu tehdyissä kokeissa selvitettyä. Suurin liukukitkakertoimeen vaikuttava tekijä on kosketuspaine. Pienillä kosketuspaineilla liukukitkakerroin on suuri. Tämä lyhentää merkittävästi laitteen pysäytysmatkaa. Vastaavasti kosketuspaineen kasvaessa, liukukitkakerroin pienenee, estäen liikkuvan kaluston pyöräkerran nousun pysäytinkenkien yli. Pysäytyskokeiden tulosten perusteella liukukitkakertoimelle määritettiin kosketuspaineesta riippuva kaava (Kaava 1).

Teoreettisten tarkastelujen ja kenttäkokeiden perusteella pysäytinkengän korkeudeksi valittiin 200 mm pyöräluiskan yläpinnasta mitattuna. Tällä korkeudella pysäyttävä raiteensulku soveltuu vauriota aiheuttamatta mitatulle henkilövaunukalustolle ja lähes kaikille tavaravaunuille. Vetokaluston pysäyttämiseen pysäyttävä

raiteensulku ei sovellu. Moottorijunista pysäyttävä raiteensulku soveltuu Sm3-kaluston (Pendolino) pysäyttämiseen. Vielä matalampi korkeus mahdollistaisi laajemman käyttökäytön, mutta tällöin on vaarana, että liikkuvan kaluston törmäävä pyörä nousisi pysäytinkengän yli.

Pysäyttävää raiteensulkua esiteltiin Rata 2008 -seminaarissa. Seminaarissa raiteensulun kehitystavoitteet määriteltiin seuraavasti:

- Vulkanoitu kitkaelementti on oltava helposti vaihdettavissa.
- Yhdellä kääntölaitteella on toteutettava kummankin kengän kääntö.
- Pysäytinkengien ollessa pois kiskoilta, on niiden oltava aukean tilan ulottuman ulkopuolella.
- Kiinnityskohdan on murruttava kaluston tullessa pysäytinkengän päälle.
- Pysäytinkengissä on oltava sähköinen käytönvalvonta. [27]

Seminaarissa esitetyt tavoitteet on saavutettu, joten tuotekehitysprojekti on mennyt selvästi eteenpäin myös vuosina 2008 ja 2009.

Pysäytinkengät kiinnitetään Konepaja Mankisen suunnittelemaan hammastankomalliseen kääntömekanismiin, minkä avulla pysäytinkengät nousevat kiskojen välistä (aukean tilan ulottuman ulkopuolelta) kiskoille. Kääntömekanismi saa voimansa sähkömekanisesta Siemens S 700 K-kääntölaitteesta. Pysäytinkengät kääntyvät kiskoille erillisestä napista tai automaattisesti asetinlaitteen turvalogiikan avulla. Kääntömekanismeissa on kolmiportainen asennonvalvonta: pysäytinkengät kiskoilla, pysäytinkengät poissa kiskoilta tai vikatila. Pysäytinkengän kiinnitys kääntömekanismiin tapahtuu kolmella M10 8.8 ruuvilla, jotka katkeavat kaluston törmätessä pysäyttävään raiteensulkuun. Törmäyksen jälkeen pysäytinkengät jäävät etummaisen pyöräkerran alle pysäyttäen liikkuvan kaluston vauhdin. Kitkaelementti kiinnitetään pysäytinkengään kuudella M8 ruuvilla, joten se on tarvittaessa helppo vaihtaa.

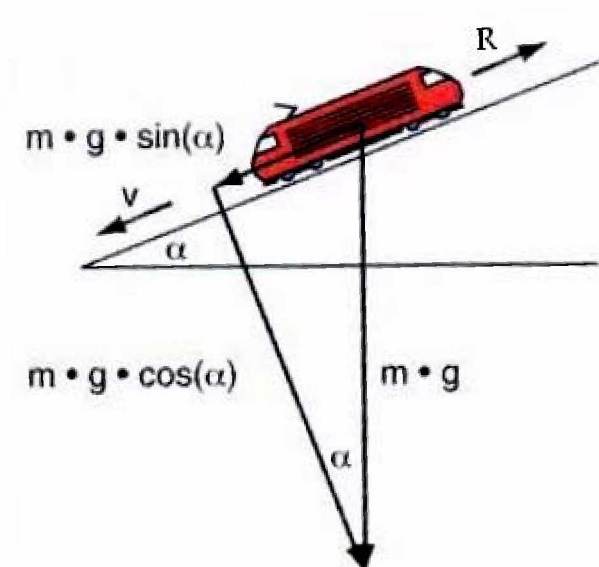
Vuodesta 2009 lähtien pysäyttävä raiteensulku on ollut koekäytössä Riihimäen ratapihalla. Runsaslumisesta talvesta huolimatta laitteen toiminnassa ei ilmennyt vikoja. Vuoden 2010 loppuun mennessä laite oli kääntynyt kiskoille noin 2000 kertaa. Pysäyttävä raiteensulku pidetään talvisin sulana vaihteenlämmitysvastuksilla ja tankokuoppalämmittimellä. Koekäytössä ilmeni, että pysäyttävän raiteensulun pysäytinkengän on syytä olla kaksisuuntainen. Kesän 2010 aikana pysäyttävän raiteensulun pysäytinkengistä suunniteltiin ja valmistettiin kaksisuuntainen versio.

Oikealla kalustolla suoritettuja pysäytyskokeita tehtiin vuosina 2006–2010 yhteensä 39 kappaletta. Kenttäkokeet tehtiin pienissä erissä, mikä hankaloitti kokeiden luotettavaa analysointia. Jälkeenpäin voidaan todeta, että kenttäkokeiden perusteella olisi ollut mahdollista selvittää useamman muuttujan vaikutus, jos kokeet olisi suunniteltu yhdeksi kokonaisuudeksi. Tämä ei kuitenkaan ollut käytännössä mahdollista. Tehtyjen pysäytyskokeiden perusteella voidaan todeta pysäyttävän raiteensulun toimivan hyvin. Pysäytyskokeissa, joissa jäljiteltiin ratapihalla karkuun päässeeseen kaluston pysäyttämistä, tyypilliset pysäytysmatkat olivat joitakin kymmeniä metrejä. Toukokuussa 2010 järjestettiin kenttäkoe, jonka tarkoituksena oli jäljitellä tammikuista Helsingin onnettomuutta (Kappale 2.1.13). Tämän kenttäkokeen tulosten perusteella voidaan todeta, että oikein sijoitettu pysäyttävä raiteensulku olisi estänyt kyseisen onnettomuuden.

3 Pysäyttävän raiteensulun toiminnan teoreettinen tarkastelu

3.1 Liikkuvan kaluston vapaa vierintä

Pysäyttävän raiteensulun pysäytysmatkaa arvioidessa on tärkeää tietää liikkuvan kaluston törmäysnopeus. Tarkastellaan yksinkertaisen matemaattisen mallin avulla vapaasti vierivää liikkuvaa kalustoa (Kuva 22). Alkutilanteessa liikkuvalla kalustolla on korkeusasemansa mukaan potentiaalienergiaa, joka muuttuu vierinnän aikana kineettiseksi energiaksi. Vierinnän aikana liikkuvan kaluston liikettä vastustaa syrjäytettävä ilma ja pyörien vierintävastus. Vierintävastus pitää sisällään laakerikitkan ja kisko-pyöräkosketuksesta aiheutuvan vastuksen. Liikettä vastustavat voimat on esitetty kuvassa symbolilla R .



Kuva 22 Kaluston vieriminen kaltevalla raiteella [28]

Energiaperiaatteen avulla liikkuvan kaluston liikkeelle saadaan seuraava yhtälö (Kaava 3). [29, s. 170–219]

$$Mgh = \frac{1}{2}Mv^2 + W_R, \quad (3)$$

jossa M on liikkuvan kaluston massa
 g on gravitaatiokiihtyvyys ($9,81 \text{ m/s}^2$)
 h on liikkuvan kaluston alkuaseman korkeus loppupisteeseen nähden
 v on liikkuvan kaluston nopeus
 W_R on liikettä vastustavien voimien tekemä työ.

Liikkuvan kaluston alkuaseman korkeus loppupisteeseen nähden ei ole usein tiedossa, joten ilmaistaan se vierintämatkan pituuden ja raiteen keskimääräisen pituuskaltevuuden avulla (Kaava 4). Pienillä kulman arvoilla voidaan tehdä yksinkertaistus $\sin \alpha \approx \alpha$, jolloin kaluston korkeusasemalle saadaan käytännöllisempi muoto.

$$h = s \sin \alpha \approx s \frac{I}{1000}, \quad (4)$$

jossa α on raiteen pituuskaltevuus radiaaneina
 s on liikkuvan kaluston vierintämatkan pituus
 I on raiteen pituuskaltevuus promilleina.

Liikkuvan kaluston liikettä vastustavien voimien tekemä työ saadaan kaavasta 5. Kaavassa olevat vastustavat voimat ovat tapahtuman aikana vaikuttavien voimien keskimääräiset arvot. Liikettä vastustavat voimat voidaan ilmaista myös kaavassa 6 esitetyn vierintävastuskertoimen avulla.

$$W_R = s(R_R + R_A) = sR = seMg, \quad (5)$$

jossa R_R on vierintävastus
 R_A on ilmanvastus
 R on liikettä vastustavat voimat
 e on vierintävastuskerroin.

Kaluston liikkeen helppous voidaan ilmaista vierintävastuskertoimella, jolla tarkoitetaan liikettä vastustavien voimien ja kaluston painovoiman suhdetta. Keskimääräinen vierintävastuskerroin junilla on luokkaa 0,0015–0,002 [30, s. 30]. Liikkuvan kaluston vierintävastuskerroin saadaan määritettyä kaavasta 6.

$$e = \frac{R}{Mg} \quad (6)$$

Sijoitetaan liikkuvan kaluston energialausekkeeseen (Kaava 3) kaavojen 4 ja 5 ratkaisut. Näin saadusta yhtälöstä voidaan ratkaista liikkuvan kaluston nopeus vierintämatkan s jälkeen (Kaava 6). Kaavassa raiteen pituuskaltevuus ja liikettä vastustavat voimat ovat vakioita. Sama kaava voidaan myös kirjoittaa kaluston vierintävastuskertoimen e avulla (Kaava 6), jolloin kaluston massa supistuu pois.

$$v = \sqrt{2s \cdot \left(-g \frac{I}{1000} - \frac{R}{M}\right)} = \sqrt{2sg \cdot \left(-\frac{I}{1000} - e\right)} \quad (7)$$

Tarkasteltaessa vierintävastuskerrointa tietyillä nopeuden ja vierintämatkan arvoilla kaava 7 saa seuraavan muodon. Raiteen pituuskaltevuus I sijoitetaan esitettyihin kaavoihin promilleina liikkeen suuntaan. Raiteen pituuskaltevuus on negatiivinen, kun kyseessä on alamäki.

$$e = -\frac{I}{1000} - \frac{v^2}{2sg} \quad (8)$$

3.2 Pahimman mahdollisen tilanteen arviointi

Tarkastellaan liikennepaikkaa, johon suunnitellaan pysäyttävän raiteensulun asentamista. Pysäyttävän raiteensulun asennusraiteen käyttöpituus on l_k . Liikennepaikalla seisotetaan kalustoa, jonka yhden vaunun keskimääräinen pituus on l_v ja vaunun keskimääräinen paino on m . Raiteen käyttöpituuden päästä lähtee vierimään kalusto, jossa on x määrä vaunuja. Vaunujen vierintämatka on riippuvainen vaunujen

määrästä, $s = l_k - xl_v$. Selvitetään mikä on vaunujen määrän pahin mahdollinen tilanne, eli millä vaunumäärällä saavutetaan suurin kaluston liike-energia. Sijoitetaan liike-energian kaavaan esitetyt arvot, kaava 7 ja siihen vierintämatkan pituuden yhtälö.

$$\begin{aligned} E_{kin}(x) &= \frac{1}{2} Mv^2 = \frac{1}{2} mx \cdot 2(l_k - xl_v)g\left(-\frac{I}{1000} - e\right) \\ &= (xl_k - x^2 l_v) \cdot mg\left(-\frac{I}{1000} - e\right) \end{aligned} \quad (9)$$

Kyseessä on alaspäin aukeava toisen asteen polynomifunktio, jonka suurin arvo on funktion derivaatan nollakohdassa. Ratkaistaan derivaatan nollakohta, jolloin vaunujen pahimmalle määrälle saadaan yksinkertainen yhtälö, joka riippuu vain raiteen käyttöpituudesta ja keskimääräisen vaunun pituudesta.

$$E'_{kin}(x) = (l_k - 2xl_v) \cdot mg\left(-\frac{I}{1000} - e\right) = 0 \Rightarrow x = \frac{l_k}{2l_v} \quad (10)$$

Sijoitetaan saatu yhtälö vaunujen vierintämatkan pituuteen.

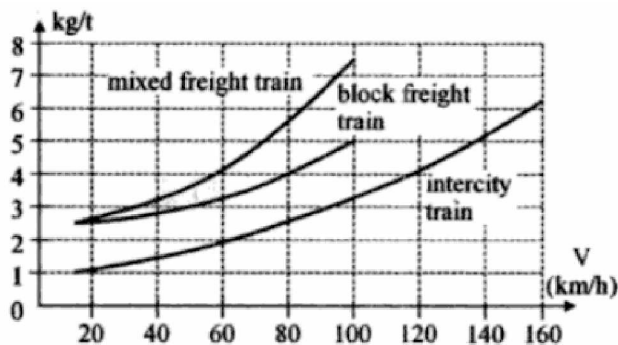
$$s = l_k - xl_v = 0,5 \cdot l_k = l_{kok}, \quad (11)$$

jossa l_{kok} on kaluston kokonaispituus.

Kaavan 11 perusteella pahimmassa mahdollisessa tapauksessa kaluston kokonaispituus on puolet raiteen käyttöpituudesta. Tämä on hyödyllinen tieto mitoitettaessa pysäyttävän raiteensulun asennuspaikkaa.

3.3 Vierintää vastustavat voimat

Liikkuvan kaluston liikkumista vastustavat päävoimat ovat ilmanvastus ja vierintävastus. Lisäksi liikettä vastustavat raiteen muutokset kuten kaarteet, tunnelit ja vaihteet. Saksan rautateillä on määritelty liikevastukselle seuraava kuvaaja (Kuva 23). Kuvassa on esitetty liikevastuskertoimet kolmelle eri kalustolle: sekatarajuna (mixed freight train), kokotarajuna (block freight train) ja matkustajajuna (intercity train). Liikevastuskerroin on ilmaistu nopeuden funktiona. Pystyakselilta voidaan lukea liikevastuskertoimen arvo kerrottuna tuhannella. Matkustajajunan liikevastuskerroin on kuvaajan perusteella 40 km/h nopeudella noin 0,0015.



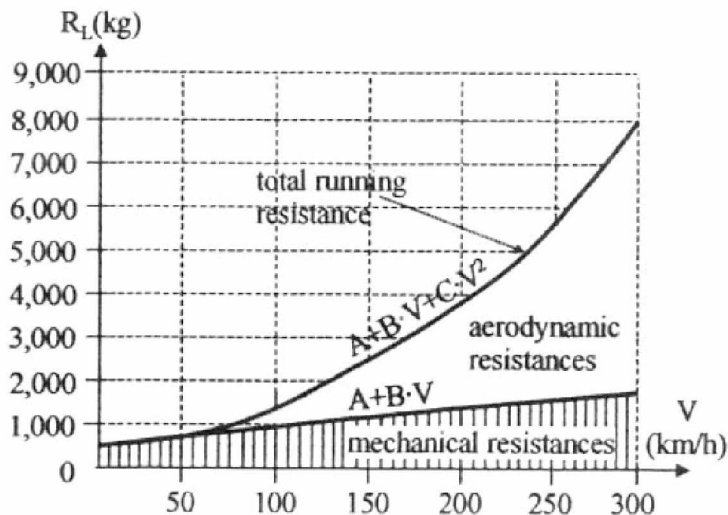
Kuva 23 Liikkuvan kaluston liikevastus nopeuden funktiona [31, s. 355]

Liikkuvan kaluston vastusvoimia voidaan arvioida seuraavalla kaavalla.

$$R = A + B \cdot V + CV^2, \quad (12)$$

jossa A on nopeudesta riippumattomat liikkuvan kaluston liikkeen vastukset
 B on nopeudesta riippuvat mekaaniset vastukset
 C on kalustokohtainen ilmanvastuskerroin
 V on nopeus (km/h).

Kuva 24 esittää vierintävastuksen ja ilmanvastuksen suhdetta nopeuden funktiona. Kuvan ylempi käyrä kertoo liikkeen kokonaisvastuksen, alempi käyrä liikkeen mekaanisen vastuksen ja käyrien väliin jäävä osa kertoo ilmanvastuksen suuruuden. Vastusvoimien suuruudet on esitetty kuvaajassa tuhansina kilogrammoina. Kuvaajasta nähdään, että ilmanvastuksella ei ole merkitystä alle 50 km/h nopeuksissa. Pysäyttävän raiteensulun toiminnan tarkasteluissa ilmanvastusta ei tarvitse huomioida, sillä oletetut törmäysnopeudet ovat alhaisia.



Kuva 24 Vierintävastus ja ilmanvastus nopeuden funktiona [31, s. 352]

3.4 Kitkaelementin liukukitkakerroin

Tässä kappaleessa tarkastellaan pysäyttävän raiteensulun kitkaelementin liuku-
 kitkakerrointa. Kitkaelementti on valmistettu kuumavalssatusta UNP 100 -teräs-
 profiilista, joka on vulkanoitu. Kitkaelementin pituus on 1600 mm ja vulkanoinnin
 paksuus noin 10 mm (Kuva 25).



Kuva 25 Pysäyttävän raiteensulun kitkaelementit [32]

Kitkaelementin kumi on Teknikum Oy:n valmistama ja sen tuotenimi on TRL20. Alun perin kumi on suunniteltu kaivosteollisuuden komponentiksi. Kumi on styreenibutadieenipohjainen ja sillä on hyvä kulutuskestävyys. Alla olevassa taulukossa on esitetty kumin tekniset ominaisuudet. Kumin suurin käyttölämpötila on 80 °C. [33]

Taulukko 14 TRL20-kumimateriaalin ominaisuudet [33]

Ominaisuus	Mittaustapa	Arvo
Kovuus	ISO 48, ASTM D2240	65 Sha
Murtolujuus	ISO 37/1	19 Mpa
Murtovenymä	ISO 37/1	350 %
Repimislujuus	ISO 34 / crescent	50 kN/m
Kulutuskestävyys	DIN 53516 / 10 N	97 mm ³

Muovien ja elastomeerien liukukitkakerroin voidaan määrittää seuraavalla kaavalla.

$$\mu = \frac{K}{F_N^{1-n_k}}, \quad (13)$$

jossa K on materiaalikohtainen vakio

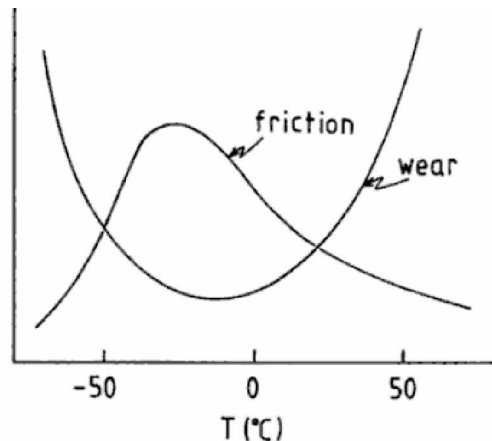
F_N on normaalivoima

n_k on materiaalikohtainen vakio, kumille $n_k \approx 2/3$.

Kaavan 13 vakiot voidaan selvittää tapauskohtaisilla kitkakokeilla [7, s. 74]. Liukukitkakertoimen kaavasta havaitaan, että kumin kitkakerroin pienenee kosketuspaineen kasvaessa. Tämä ominaisuus on eduksi, jos liikkuvan kaluston pelätään nousevan liiallisen kitkavoiman takia pysäyttävän raiteensulun ylitse. Kosketuspaineen ja kumimateriaalin lisäksi kitkakertoimeen vaikuttavat kiskon pinnan epäpuhtaudet, kiskon kuluneisuus, kiskon lämpötila, kumin lämpötila ja liukunopeus.

Liukumisen aikana kitkaelementin pinta lämpenee, minkä seurauksena myös kumin liukukitkakerroin muuttuu. Kuva 26 esittää kumin liukukitkakerrointa (friction) ja kulumista (wear) lämpötilan funktiona. Kuvaajan tarkoituksena on hahmottaa miten kyseiset suureet muuttuvat lämpötilan mukaan. Kuvaajasta ei voida lukea suoraan liukukitkakertoimen arvoja, sillä ne ovat riippuvaisia kokeissa käytetystä materiaalista ja liukunopeudesta. [34] Alhaisella kaluston törmäysnopeudella kumin liukukitkakerroin kasvaa lämpötilan nousun seurauksena pysäytyksen aikana. Tämän johdosta kaluston hidastuvuus kasvaa pysäytyksen loppuvaiheessa. Pitkällä pysäytysmatkalla on mahdollista saavuttaa kumin liukukitkakertoimen maksimi.

tarkastelun perusteella Mäntyluodon kenttäkokeiden pysäytykset eivät saavuttaneet liukukitkakertoimen maksimia, sillä hidastuvuus kasvoi pysäytyksen loppuvaiheessa. Kitkaelementin kumin vulkanointipaksuus on 10 mm, joten kumin kulumisesta ei aiheudu normaalioloissa ongelmia. Pysäytyskokeissa samaa kitkaelementtiä käytettiin useita kertoja. Kumin kulumisen kasvaa lämpötilan laskiessa. Lämpötilan vaikutus kumin kulumiseen saadaan selville talvella järjestettävissä pysäytyskokeissa.

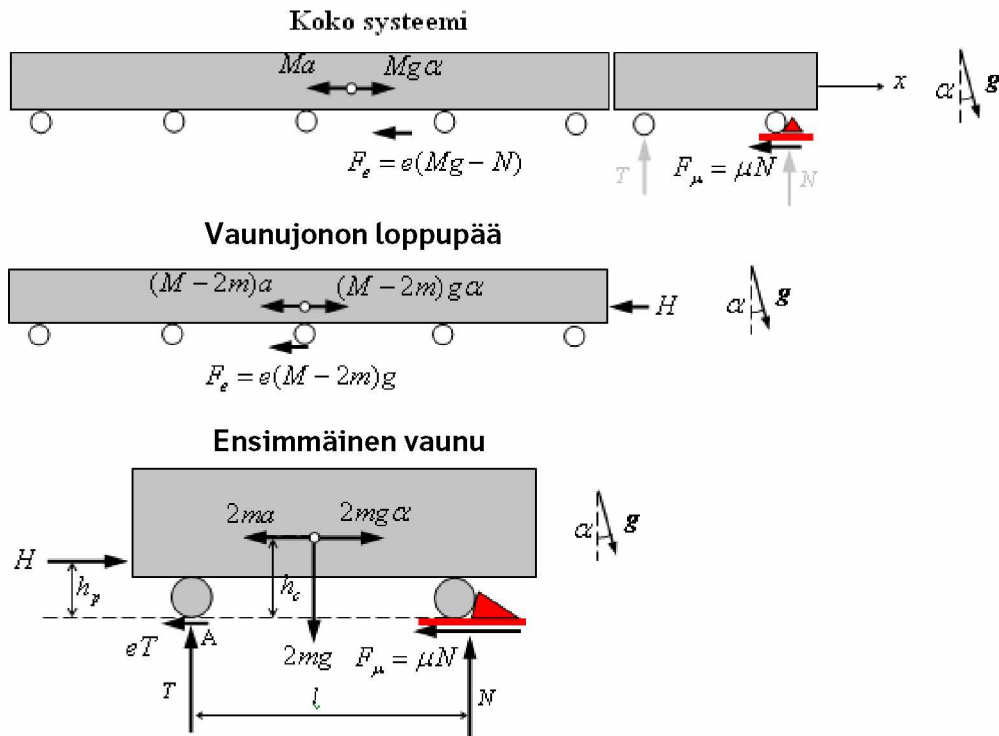


Kuva 26 Lämpötilan vaikutus kumin liukukitkakertoimeen ja kulumiseen [34, s. 91]

Pysäyttävän raiteensulun kitkaelementin ja kiskon välinen liukukitkakerroin ei ole vakio, vaan muuttuu pysäytyksen aikana liukunopeuden, kumin lämpötilan ja kosketuspaineen muuttuessa. Tämän seurauksena liikkuvan kaluston hidastuvuus ei ole myöskään vakio, vaan se vaihtelee liukukitkakertoimen muutoksen myötä. Koska hetkellisen liukukitkakertoimen määrittäminen ei ole pysäytysmatkoja tutkiessa tarpeellista, ovat tässä työssä esitetyt liukukitkakertoimet pysäytyksen keskimääräisiä arvoja.

3.5 Liikkuvan kaluston pysäyttäminen

Tarkastellaan liikkuvan kaluston etummaisen pyöräkerran ja raiteen välistä normaalivoimaa (N). Levossa tai tasaisessa liikkeessä kyseinen normaalivoima on $N = mg$. Kun liikkuvan kaluston liikettä jarrutetaan pysäyttävällä raiteensululla, kasvavat etummaisen pyöräkerran ja raiteen välinen kosketuspaine sekä normaalivoima. Normaalivoiman kasvu johtuu puskimen ja ensimmäisen vaunun massakeskipisteen korkeusasemien erosta sekä kaluston hidastuvuudesta. Kuva 27 esittää pysäytysmallin vapaakappalekuvaa, jonka avulla voidaan selvittää akselipainon lisääntyminen pysäytyksen aikana. Laskuissa oletetaan liikettä vastustavien voimien ja siten myös liikkuvan kaluston hidastumisen olevan vakioita.



Kuva 27 Vapaakappalekuva kalustosta ja pysäyttävästä raiteensulusta [32]

Pysäytettävän kaluston ensimmäisen pyöräkerran normaalivoiman kasvu voidaan ilmaista yhtälöllä $N = kmg$, missä k on vaunun akselipainon korjauskerroin. Yhtälö saadaan ratkaistua kuvan liikeyhtälöiden avulla. Akselipainon korjauskerroin saadaan laskettua kaavalla 14. [32]

$$k = \frac{1 + 2e \frac{h_c}{l}}{1 - (\mu - e) \left(\frac{h_p}{l} - 2 \frac{m}{M} \frac{h_c - h_p}{l} \right)}, \quad (14)$$

jossa e on vierintävastuskerroin
 h_c on vaunun massakeskipisteen korkeus raiteesta
 l on akseliväli
 μ on kitkaelementin liukukitkakerroin
 h_p on puskimen etäisyys kiskon selän korkeudesta (1,06 m)
 m on akselin aiheuttama paino (tonnia)
 M on liikkuvan kaluston kokonaispaino (tonnia).

Tarkastellaan lineaarisen laskentamallin avulla liikkuvan kaluston pysäyttämistä pysäyttävällä raiteensululla. Mallissa liikkuva kalusto liikkuu alaspäin kaltevalla radalla ja törmää pysäyttävään raiteensulkuun nopeudella v . Liikkuvalla kalustolla on törmäyshetkellä nopeudesta johtuen kineettistä energiaa ja korkeusasemansa mukaan potentiaalienergiaa. Törmäyksen jälkeen liikkuvan kaluston energia muuntuu liikettä vastustavien voimien tekemäksi työksi. Liikkuvan kaluston energialle saadaan seuraava yhtälö. [29, s. 180–219]

$$\frac{1}{2} Mv^2 + Mgs \frac{l}{1000} = s(R + \mu kmg) \quad (15)$$

Ratkaisemalla s kaavasta 15, saadaan arvio liikkuvan kaluston pysäytysmatkalle. Liikettä vastustavien voimien R sijasta pysäytysmatkan laskentakaavassa voidaan

käyttää myös vierintävastuskertoimen e arvoa. Raiteen pituuskaltevuus I sijoitetaan esitettyihin kaavoihin promilleina liikkeen suuntaan. Raiteen pituuskaltevuus on negatiivinen, kun kyseessä on alamäki.

$$s = \frac{0,5 \cdot Mv^2}{R + g(\mu km + M \frac{I}{1000})} = \frac{0,5 \cdot Mv^2}{g(e + \mu km + M \frac{I}{1000})} \quad (16)$$

Pysäytysmatkan kaava antaa vain arvion liikkuvan kaluston pysäytysmatkasta. Todellisuudessa liikettä vastustavat voimat eivät ole pysäytyksen aikana vakioita, vaan ne muuttuvat muun muassa nopeuden ja lämpötilan muuttuessa. Tästä seuraa, että liikkuvan kaluston hidastavuus ei ole vakio. Kaavan avulla voidaan antaa kohtuullinen arvio pysäytysmatkan pituudesta.

Pysäytysmatkan kaavan nimittäjän mennessä kohti nollaa, lähestyy pysäytysmatka kohti ääretöntä. Näin saadaan selville pysäyttävän raiteensulun toiminnan kriittinen pituuskaltevuusraja. Tätä jyrkemmillä kaltevuuksilla pysäyttävä raiteensulku ei pysty hiljentämään kaluston nopeutta, vaan vauhti kiihtyy.

$$I = - \frac{(e + \mu km) \cdot 1000}{M} \quad (17)$$

4 Pysäytyskokeiden tulokset ja pysäytysmatkan arviointi

4.1 Pysäytyskokeiden tulosten tarkastelua

Tässä kappaleessa tarkastellaan pysäyttävän raiteensulun pysäytyskokeiden tuloksia yhtenä kokonaisuutena. Pysäytyskokeiden tulokset ja tuloksista lasketut tunnusluvut on esitetty liitteessä 4.

Pysäyttävän raiteensulun pysäytysmatkan tarkasteluita hankaloittaa eri kaluston vierintävastuksen vaihtelu. Kappaleessa 2.1.7 on esitetty vuosina 2006 ja 2007 tehtyjen vierintäkokeiden tuloksia. Vierintäkokeiden vierintävastuskertoimet vaihtelivat kokeissa välillä 0,0013–0,0026. Kappaleessa 3.1 on esitetty vierintävastuskertoimen tyypilliseksi arvoksi 0,0015–0,002. Kuva 23 esittää taas vierintävastuskertoimien arvon vaihtelevan alhaisilla nopeuksilla välillä 0,001–0,003. Ratateknisten määräysten ja ohjeiden osan 7 perustelumuiiston mukaan on -2,5 ‰ pituuskaltevuus tyypillinen liukulaakeroitujen vaunujen vierimään lähtemisen raja-arvo tyynellä säällä, kun taas vierintälaakeroituilla vaunuilla raja-arvo on -1,5 ‰ [35, s. 26]. Liikenneviraston ratatekniset ohjeet radan geometriasta määrittävät taas vierintävastuskertoimen arvoksi henkilöjunille 0,00254 ja tavarajunille 0,00255 [15, s. 57]. Vierintävastuskertoimen määrittäminen ei onnistu luotettavasti myöskään junien liikkeen simulointiin suunnitellulla OpenTrack-ohjelmalla. Simulointiohjelman kaavat on suunniteltu junan normaaleille liikenopeuksille, eikä niitä voi käyttää vierintävastuksen arvioinnissa hyvin hiljaisilla nopeuksilla. [28, s. 67–68] Vierintävastuksen määrittämistä vaikeuttaa suuren kalustovariaation lisäksi myös erilaiset raiteet. Raskaiden tavaravaunujen vierimään lähtemisen raja-arvoon vaikuttaa varmasti kaluston lisäksi myös radan päällysrakenne. Vanhemmat raiteet koostuvat radesorasta, puuratapölkkyistä ja kiskosta, jonka kiskopaino on 30 kg/m. Sen sijaan uudemmat raiteet koostuvat raidesepelistä, betonipölkkyistä ja kiskoista, joiden kiskopaino on 54 tai 60 kg/m [17]. Liikkuvalle kalustolle ei siis voida määrittää yleisesti voimassa olevaa vierintävastuskerrointa. Tässä työssä esitetyissä pysäyttävän raiteensulun pysäytysmatkatarkasteluissa on käytetty kaluston vierintävastuskertoimena 0,0015.

Liitteen 4 taulukossa 2 on esitetty pysäytyskokeiden tulokset. Eri kenttäkokeet on erotettu toisistaan tummilla vaakaviivoilla. Liitteen 4 ensimmäisellä ja toisella sivulla on selvitetty tarkemmin taulukkojen 2 ja 3 merkintöjä sekä laskutapoja. Pysäytyskokeiden aikana vallinneet sääolot on selvitetty Ilmatieteenlaitoksen tilastoista. Tarkoituksena oli selvittää ilman lämpötilan vaikutus kitkaelementin liukukitkakertoimeen. Lämpötilan vaikutusta ei kuitenkaan saatu selville suhteellisen pienen lämpötilanvaihtelun ja kokeiden suuren variaation takia.

Liitteen 4 taulukossa 3 on esitetty pysäytyskokeiden tulosten avulla laskettuja tunnuslukuja. Tarkastellaan pysäytyskokeiden tuloksien avulla laskettuja keskimääräisiä kitkaelementin liukukitkakertoimia (Taulukko 15).

Taulukko 15 Pysäytyskokeiden liukukitkakertoimet eri akselipainoilla

Koe	Akselipaino (kN)	Liukukitka- kertoimen keskiarvo	Liukukitka- kertoimen keskihajonta	Liukukitka- kertoimen luottamusväli
1-10	190	0,56	0,16	$0,56 \pm 0,13$
11-26	62,5	1,02	0,17	$1,02 \pm 0,12$
27-29	100	0,96	0,14	$0,96 \pm 0,14$
30-36	72,5	0,81	0,07	$0,81 \pm 0,07$
37-39	78	0,97	0,05	$0,97 \pm 0,07$




Liukukitkakertoimet eroavat kappaleessa 2.1 esitetystä liukukitkakertoimista laskentatavan takia. Pysäytyskokeet on jaettu törmäävän pyöräkerran akselipainon mukaan viiteen eri luokkaan. Painoluokat on eroteltu värillä liitteen 4 taulukossa 3. Teorian mukaan suurimmalla akselipainolla pitäisi olla pienin liukukitkakerroin ja vastaavasti pienimmällä akselipainolla suurin. Teorian mukaisesti pienin liukukitkakertoimen keskiarvo 0,56 on suurimmalla 190 kN akselipainolla ja vastaavasti suurin liukukitkakertoimen keskiarvo 1,02 on pienimmällä 62,5 kN akselipainolla. Toiseksi suurin liukukitkakertoimen keskiarvo on 100 kN akselipainolla, mikä ei vastaa teoriaa. Tämä saattaa johtua otoksen pienestä koosta. Liukukitkakertoimien hajonnasta johtuen tuloksista on vaikea vetää johtopäätöksiä. Taulukon viimeiseen sarakkeeseen on laskettu 99 % luottamustasolla liukukitkakertoimien luottamusväli eri akselipainoilla. Luottamusvälin alarajan alapuolelle jääneet liukukitkakertoimen arvot ovat kokeista 7, 25, 26 ja 34. Erityisesti kokeiden 7 ja 26 liukukitkakertoimien arvot 0,39 ja 0,70 poikkeavat paljon keskiarvosta. Poikkeamat havainnollistavat tulosten hajonnan muodon. Suurimmat poikkeamat eivät mahdu 99 % luottamustasolla laskettuun luottamusväliin, vaikka pysäytyskokeita tehtiin vain 39 kappaletta. Pääsääntöisesti liukukitkakertoimien arvot ovat siis lähellä toisiaan, mutta poikkeamat voivat olla suuria.

Törmäävän pyöräkerran akselipainon korjauskertoimen pienin arvo 1,05 on kokeessa 7 ja suurin arvo 1,21 on kokeessa 24. Tuloksista nähdään, että akselipainon korjauskerroin on vahvasti riippuvainen liukukitkakertoimen arvosta. Tämä on teorian mukaista, sillä suuri liukukitkakerroin aiheuttaa suuren hidastuvuuden ja samalla dynaamisen akselipainon kasvun. Keskimäärin kaluston hidastuvuuden ja törmäävän vaunun geometriasta aiheutuva dynaaminen akselipainon kasvu on 11 %.

Liitteen 4 taulukon 3 kriittinen pituuskaltevuus -sarake tarkoittaa raiteen pituuskaltevuutta, jossa kitkaelementin kitkavoima ei enää riitä liikkuvan kaluston pysäyttämiseen. Kaluston kriittisissä pituuskaltevuuksissa on suuria eroja. Koekaluston suurimmat kriittiset pituuskaltevuudet ovat jyrkempiä kuin -100 ‰, pienimpien jäädessä loivemmaksi kuin -10 ‰. Pienin kaluston kriittinen pituuskaltevuus -3,5 ‰ on kokeessa 26. Tulos ei ole yllättävä, sillä kaluston kokonaispaino oli tehdyistä kokeista suurin (1378 tonnia) ja vastaavasti törmäävän vaunun akselipaino oli kaikista kevyin (62,5 kN). 3,5 ‰ on silti jyrkempi kuin ratapihojen suurin sallittu pituuskaltevuuden raja 1,5 ‰, joten tässäkin tapauksessa pysäytinkien tuottama pysäytysvoima oli pysäytyksen kannalta merkittävä.

Pysäyttävän raiteensulun pysäytyskokeiden nopeudet ja kalustopainot vaihtelivat kokeiden välillä hyvin paljon. Myös raiteen pituuskaltevuuksissa oli eroja, minkä johdosta tuloksia on vaikea vertailla. Tarkastelemalla liikkuvan kaluston törmäysenergiaa, saadaan helpommin käsitys tarvittavista pysäytysvoimista. Liikkuvan kaluston kokonaisenergian ollessa alle 1 MJ, ovat pysäytysmatkat alle 10 metriä, kun

taas yli 10 MJ törmäysenergioilla liikkuvan kaluston pysäytysmatkat ovat yli 100 metriä. Liitteen 4 taulukossa 3 törmäysenergiat on luokiteltu väreittäin:

 < 1 MJ,  1–10 MJ ja  > 10 MJ.

Liitteen 4 taulukkoon 3 on laskettu pysäytyksessä kaluston liikettä vastustavien voimien prosentuaaliset osuudet. Vierintävastuksen osuus kaluston liikettä vastustavista voimista vaihtelee paljon ollen pienimmillään 1,3 %, kun suurin arvo on 30,0 %. Keskimäärin vierintävastuksen osuuden voidaan sanoa olevan pieni, mutta merkittävä. Vierintävastuksen huomioiminen pysäytysmatkan laskennassa on siis perusteltua. Kitkaelementin aiheuttaman pysäytysvoiman osuus liikettä vastustavista voimista on keskimäärin 93,2 %.

Liitteen 4 taulukossa 4 on esitetty kaavan 13 sopivuus kitkakertoimen mallintamiseen. Liukukitkakertoimen materiaaliikohtaiset vakiot on selvitetty matemaattisella optimointimenetelmällä, jossa etsitään aineiston ja sovittujen arvojen erotusten pienin neliöiden summa vaihtelemalla muuttujien arvoja (K ja n_k). Pienin neliösumma on löydetty Microsoft Office Excel taulukkolaskentaohjelman Ratkaisin-apuohjelman avulla. Liukukitkakertoimien erotusten neliösumman pienin arvo on 0,9507. Tällöin materiaali vakiot saavat arvot $K=231,5$ ja $n_k=0,5062$. Sovitukseen on otettu mukaan kaikki pysäytyskokeiden tulokset. Teorian mukaan materiaali vakion pitäisi olla kumilla $n_k \approx 2/3$ (Kappale 3.4). Tällä arvolla pienin neliösumma jää selvästi yli yhden. Suurempi neliösumma tarkoittaa, että vakio $n_k=2/3$ soveltuu huonosti liukukitkakertoimen kuvaamiseen.

Teknillisen korkeakoulun Rakenteiden mekaniikan laboratorion raporteissa on esitetty liukukitkakertoimen noudattavan kaavaa 1. Liitteen 4 taulukossa 5 on kaava 1 sovitettu pysäytyskokeiden liukukitkakertoimiin. Liukukitkakertoimien erotusten neliösumman pienin arvo on 0,9434. Tällöin kaavan vakiot saavat arvot $A=0,6401$ ja $B=0,0095$. Neliösumma on hieman pienempi kuin kaavaa 13 sovittaessa, joten kaava 1 kuvaa hieman tarkemmin liukukitkakertoimien käyttäytymistä. Kaavaa 1 käytettäessä on huomioitava, että kosketuspaine on syötettävä muodossa kN/m. Vielä pienempi neliösumma ja tarkempi kuvaavuus saataisiin aikaan, jos liukukitkakertoimen kaavassa huomioitaisiin liukunopeus ja pysäytysmatka. Tällöin tarvittaisiin lisää pysäytyskokeita.

4.2 Pysäytysmatkan arviointi laskentamallin avulla

Tässä kappaleessa on esitetty pysäyttävän raiteensulun pysäytysmatkoja erilaisissa tilanteissa. Esitetyt liukukitkakertoimet on laskettu kaavan 1 avulla, vakioiden arvoilla $A=0,6401$ ja $B=0,0095$. Akselipainon korjauskerroin on laskettu kaavalla 14. Kaluston vierintävastuksena on käytetty arvoa 0,0015. Pysäytysmatkat on laskettu kuvassa 47 esitettyjen kaavojen avulla.

4.2.1 Pysäytystapahtuman muuttujien valinta

Liukukitkakertoimen, akselipainon korjauskertoimen ja vierintävastuksen lisäksi pysäyttävän raiteensulun pysäytysmatkaan vaikuttavat kaluston kokonaispaino, törmäävän vaunun akselipaino, raiteen pituuskaltevuus ja kaluston nopeus. Tässä kappaleessa on esitetty kyseisten muuttujien valinta pysäytysmatkatarkasteluja varten.

Kaluston kokonaispaino

Liikenteen turvallisuusvirasto Trafin määräyksen mukaan suurin sallittu junapaino ruuvikytkimellä varustetuille vaunuille on 3100 tonnia (Taulukko 16). Jos junan kaikki vaunut on varustettu automaattikytkimillä, voidaan junan kokonaispaino määrittää vetokyvyn mukaan. [36] Keskimäärin tavarajunien kokonaispainot ovat 2000 tonnin luokkaa [37, 57 s.]. Valitaan pysäytysmatkatarkasteluun kaluston kokonaispainoksi 1000–3000 tonnia.

Taulukko 16 Sallitut junapainot ruuvikytkimellä varustetuille tavaravaunuille [36]

Suurin sallittu vetovoima (kN)	Radan junapainoon vaikuttava suurin nousu (‰)							
	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
	Junapaino (t)							
350	2400	2000	1800	1600	1400	1300	1200	1100
450	3100	2700	2300	2000	1800	1600	1500	1400

Törmäävän vaunun akselipaino

Liukukitkakerroin ja kosketuspaine ovat riippuvaisia törmäävän vaunun akselipainosta. Alhainen akselipaino kasvattaa liukukitkakerrointa, mutta alhaisen kosketuspaineen takia liukukitkavoima jää silti alhaiseksi. Kevyiden tavaravaunujen akselipaino on tyhjänä noin 60 kN. Kuormattuna vanhemmat vaunut sallivat 200 kN akselipainon. Kaikki uudet vaunut on varustettu 250 kN akselipainon sallivilla teleillä. Pysäytysmatkatarkasteluissa törmäävän vaunun akselipainona tulee ensisijaisesti käyttää alhaista akselipainoa, jotta tarkasteltaisiin pahinta mahdollista tilannetta.

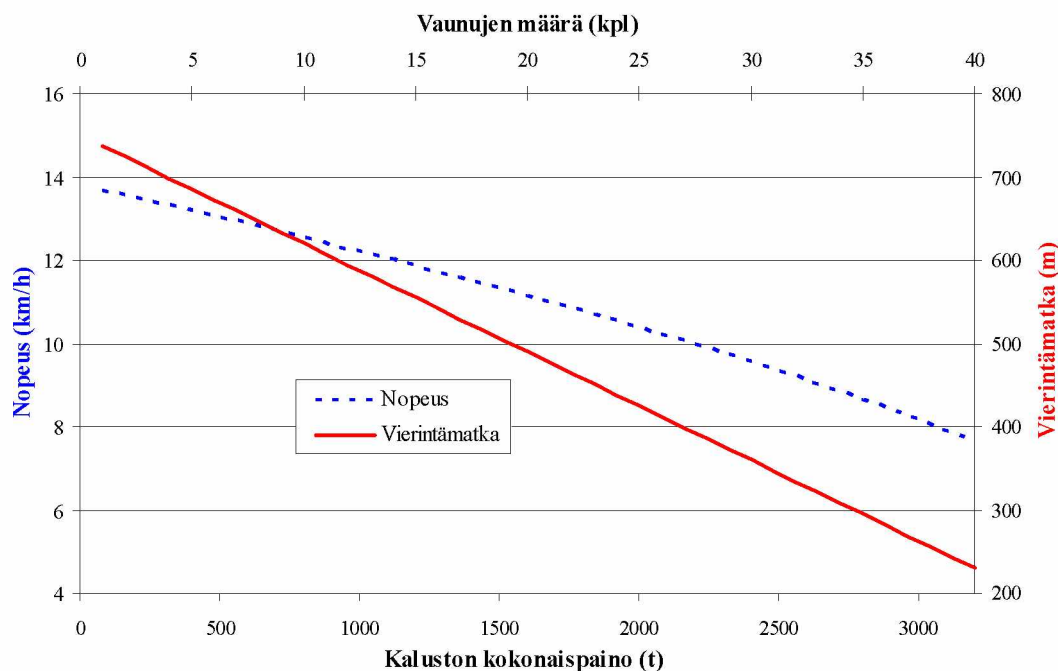
Raiteen pituuskaltevuus

"Uuden pysäköintiin tai kuormaukseen käytettävän raiteen pituuskaltevuus saa käyttöpituuden matkalla keskimääräisesti olla itseisarvoltaan enintään 1,5 ‰." [38] Tämä on vuonna 2006 tullut ohjeistus ja käytännössä useiden ratapihojen pituuskaltevuus on maksimissaan 2,5 ‰ [41]. Valitaan pysäytysmatkatarkasteluun raiteen pituuskaltevuudeksi -2,5 ‰ kulkusuuntaan nähden.

Vierintänopeus

Tarkastellaan rautatieliikennepaikkaa, jossa on kaluston karkaamisen riski. Kaluston vierintänopeus on riippuvainen matkasta ja raiteen pituuskaltevuudesta. Rautatieliikennepaikkojen raiteiden hyötypituudet vaihtelevat 100–1500 metrin välillä, riippuen raiteen käyttötarkoituksesta ja suunnittelun aikaisista mitoitusohjeista. Muutettavan tavaraliikenneraiteen mitoittavan hyötypituuden on oltava vähintään 700 m ja pysähtymisvaran vähintään 30 m [39]. Tarkastellaan tilannetta, jossa täydessä kuormassa oleva tavaravaunujono karkaa käyttöpituudeltaan 750 metrin mittaisen rautatieliikennepaikan raiteen yläpäästä.

Kuva 28 esittää kaluston nopeutta ja vierintämatkaa, vaunujen määrän ja kaluston kokonaispainon funktiona. Tarkasteltavan rautatieliikennepaikan raiteen käyttöpituus on 750 m ja pituuskaltevuus koko matkalta on -2,5 ‰ liikkeen suuntaan. Kalustona käytetyn vaunun paino on 80 tonnia ja pituus 13 metriä.

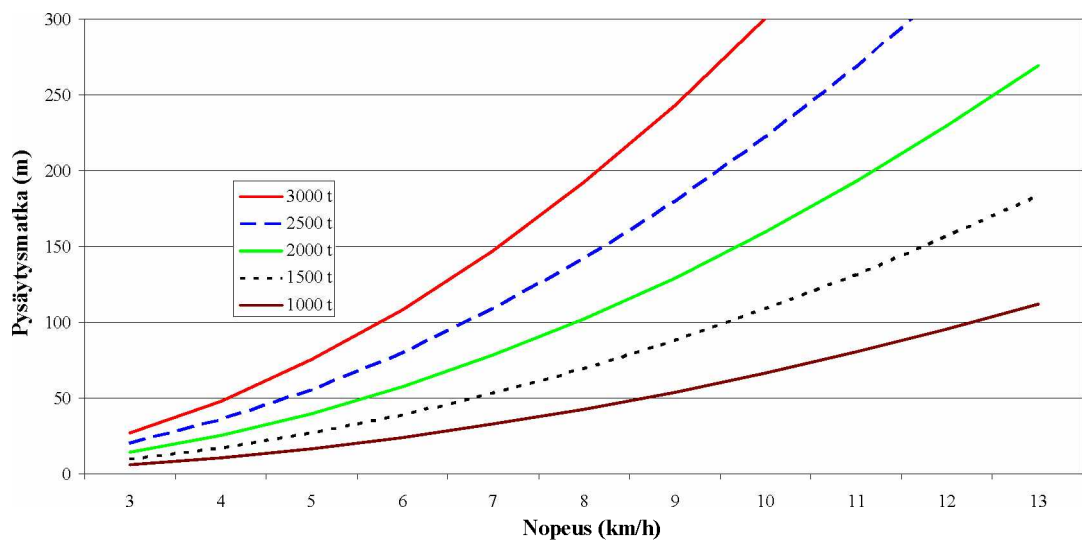


Kuva 28 Vierintänopeus ja vierintämatka kaluston määrän funktiona, raiteen käyttöpituus 750 m ja pituuskaltevuus -2,5 ‰

Kuvasta 28 nähdään, että 1000 tonnia painavan kaluston vierintämatka voi olla lähes 600 metriä, jonka aikana kalusto voi saavuttaa yli 12 km/h nopeuden. Vastaavasti 3000 tonnia painavan kaluston maksimivierintämatka on 250 metriä ja loppunopeus 8 km/h. Valitaan pysäytysmatkatarkasteluun nopeusalueeksi 3–13 km/h.

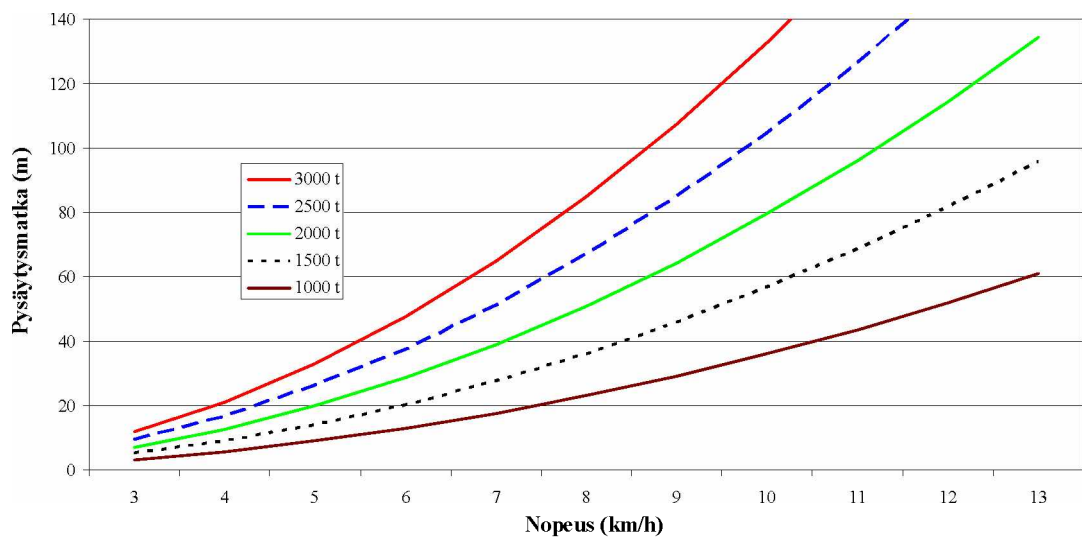
4.2.2 Pysäytysmatka eri tilanteissa

Kuva 29 esittää pysäyttävän raiteensulun pysäytysmatkoja tilanteessa, jossa vaihtotyön mahdollistavalta liikennepaikalta pääsee karkuun raskas kalusto, mutta pysäyttävään raiteensulkuun törmäävä vaunu on tyhjä (akselipaino 60 kN). Kuvassa esitetyn tapauksen keskimääräinen liukukitkakerroin on 1,01 ja akselipainon korjauskerroin 1,14. Kuten kuvasta nähdään, pysäytysmatkat kasvavat suuriksi, eikä kevyen akselipainon tuottama kitkavoima tahdo riittää raskaan kaluston pysäyttämiseen. Liike-energia kasvaa nopeuden neliöön, joten törmäysnopeudella on suuri vaikutus pysäytysmatkaan.



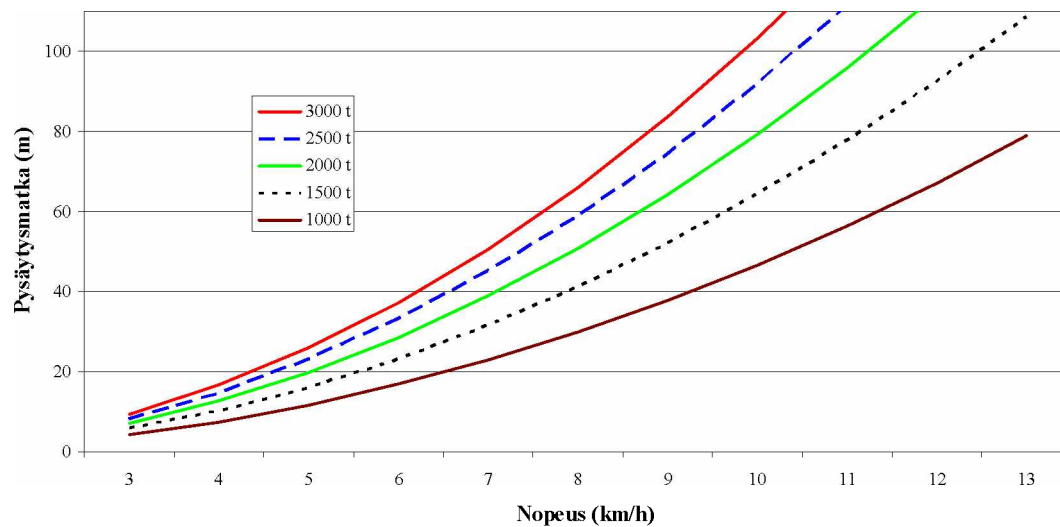
Kuva 29 Pysäytysmatka nopeuden funktiona eri kalustopainoilla, törmäävän vaunun akselipaino 60 kN ja raiteen pituuskaltevuus -2,5 ‰

Kuva 30 esittää edellisen kaltaista tilannetta, mutta törmäävän vaunun akselipaino on 200 kN. Pysäytyskeskimääräinen liukukitkakerroin on tällöin 0,55 ja akselipainon korjauskerroin 1,07. Akselipainon kasvu lähes puolittaa liukukitkakerroimen, mutta lisääntyneen kitkavoiman johdosta, pysäytysmatkat laskevat selvästi. Pysäyttävä raiteensulku toimii siis tehokkaasti tapauksissa, joissa törmäävän vaunun akselipaino on suuri.



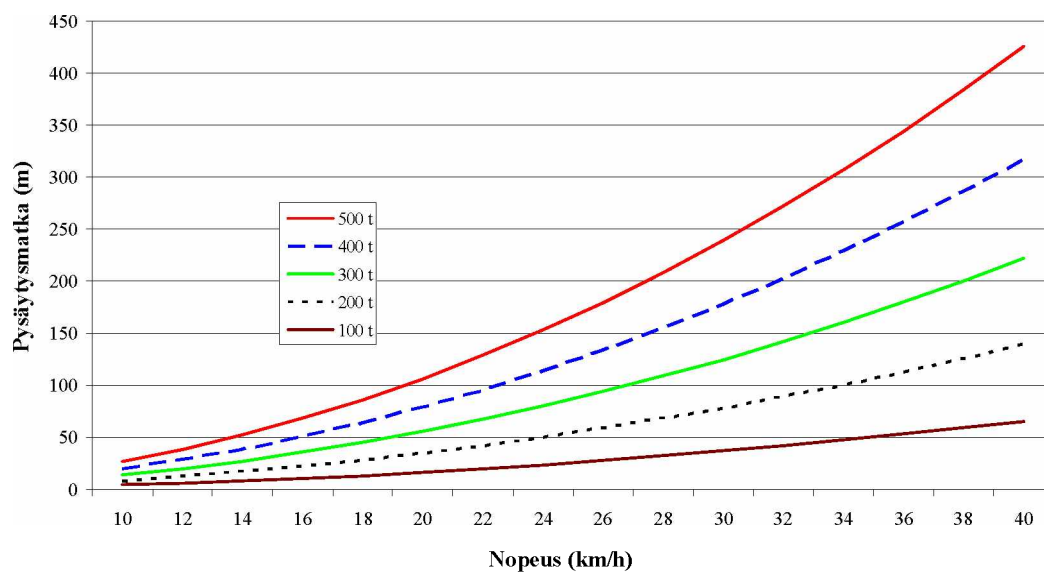
Kuva 30 Pysäytysmatka nopeuden funktiona eri kalustopainoilla, törmäävän vaunun akselipaino 200 kN ja raiteen pituuskaltevuus -2,5 ‰

Törmäävän vaunun akselipainon lisäksi pysäytysmatkaan vaikuttaa pysäytysmatkan pituuskaltevuus. Kuva 31 esittää pysäytysmatkoja tilanteessa, jossa törmäävän vaunun akselipaino on 60 kN, mutta raiteen pituuskaltevuus kaluston pysäytyksen aikana on 0 ‰. Pysäytysmatkoja verrattaessa huomataan pituuskaltevuudella olevan suuri vaikutus pysäytysmatkaan. Pysäyttävää raiteensulkua mitoittaessa on huomioitava vierintämatkan sekä pysäytysmatkan pituuskaltevuudet.



Kuva 31 Pysäytysmatka nopeuden funktiona eri kalustopainoilla, törmäävän vaunun akselipaino 60 kN ja raiteen pituuskaltevuus 0 ‰

Kuten kappaleessa 6.2.4 on esitetty, pysäyttävä raiteensulku tullaan asentamaan Helsingin päärautatieaseman suojaksi raiteille 226 ja 227. Pasilan suunnasta karkaavien matkustajavaunujen pysäytys on hyvin erilainen tilanne verrattuna kuormauspaikalta vierimään lähtevien tavaravaunujen pysäyttämiseen. Nopeudet voivat ovat suuria pitkän vierintämatkan takia, mutta vastaavasti vaunujen määrä on alhaisempi ja samalla käytössä on enemmän pysäytysmatkaa. Valitaan tarkastelussa törmääväksi vaunuksi yleisin yksikerroksinen InterCity-vaunu (tunnus Ex). Vaunun paino on 51 tonnia ja akselipaino on 145 kN [40]. Pysäytyksen keskimääräiseksi liukukitkakertoimeksi saadaan kaavan 1 avulla 0,68 ja akselipainon korjauskertoimeksi 1,05. Pysäytyksen keskimääräinen raiteen pituuskaltevuus on noin -7,0 ‰ liikkeen suuntaan (Kappale 6.2.5). Kuva 32 osoittaa pysäyttävän raiteensulun toimivan hyvin matkustajavaunujen pysäyttämässä. Kaluston suuresta nopeudesta ja raiteen pituuskaltevuudesta huolimatta, pysäytysmatkat jäävät kohtuullisiksi raskaan akselipainon aiheuttaman kitkavoiman takia.



Kuva 32 Pysäytysmatka nopeuden funktiona eri kalustopainoilla, törmäävän vaunun akselipaino 145 kN ja raiteen pituuskaltevuus -7,0 ‰

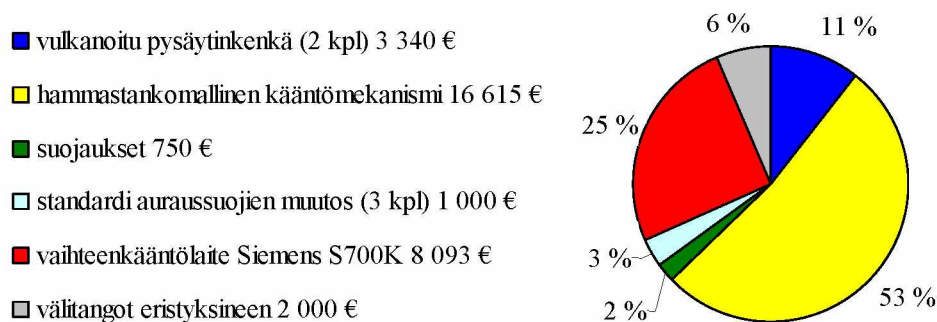
Pysäyttävän raiteensulun pysäytysvoima ei riitä pysäyttämään vaunujonoa työntävää veturia. Törmäävän vaunun akselipainon ollessa 250 kN (suurin mahdollinen) pysäytinkien liukukitkakerroin on 0,48. Tällöin pysäytysvoima on 120 kN. Taulukosta 16 nähdään, että ruuvikytkimillä varustettujen vaunujen veturin vetovoima voi olla 450 kN.

5 Pysäyttävän raiteensulun kehitys- ehdotukset

5.1 Kustannuslaskelmat

Kappaleessa 2.1.14 on esitetty pysäyttävän raiteensulun kustannusvertailu turva-
vaihteeseen verrattuna Majajärven liikennepaikalla. Tässä kappaleessa selvitetään
pysäyttävän raiteensulun kustannuksia yleisemmällä tasolla. Pysäyttävä raiteensulku
tarvitsee toimiakseen riittävästi pysäytysmatkaa. Useissa paikoissa pysäytysmatkaa
rajoittavana tekijänä on sivuraiteen opastimen etäisyys suojaavan raiteen
vaihteesta. Yhden opastimen siirtäminen 50 metriä maksaa noin 3 800 € [41].
Kustannusten puolesta opastimen siirto on mahdollista, mutta siirto aiheuttaa
katkoksen liikenteeseen ja ennen kaikkea lyhentää raiteen käyttöpituuutta.
Pääsääntöisesti sivuraiteiden käyttöpituuksissa ei ole ylimääräisiä metrejä, joten
pysäyttävää raiteensulkua ei kannata asentaa paikkaan, jossa opastinta joudutaan
siirtämään.

Pysäyttävän raiteensulun osien hinta on noin 32 000 €, joka on Majajärven
tapauksessa 55 % kokonaiskustannuksista. Tarkastellaan pysäyttävän raiteensulun
osien kustannusjakaumaa (Kuva 33). Suurimmat kustannukset aiheutuvat
hammastankomallisesta kääntömekanismista 53 % ja vaihteenkääntölaitteesta 25 %.
Pysäytinkenkäparin kustannukset ovat 11 % kokonaiskustannuksista, joten
pysäytinkengän rakenteen muuttamisella ei saavuteta suuria säästöjä pysäyttävän
raiteensulun kokonaiskustannuksiin verrattuna. Pysäytinkenkäparin hinta 3 340 € on
kustannuksiltaan kohtuullinen. Vulkanoidun kitkaelementin hinta on 250 €, joka on
noin 15 % yhden pysäytinkengän kustannuksista. Kitkaelementtien vaihtamisesta ei
siis aiheudu suuria kustannuksia. Pysäyttävän raiteensulun suurimmat kustannukset
aiheutuvat keskitetysti ohjatusta käännöstä. Pelkästään vaihteenkääntölaitteen ja
kääntömekanismin hinta on yhteensä 24 708 €, eli 78 % pysäyttävän raiteensulun
osien hinnasta.



Kuva 33 Pysäyttävän raiteensulun osien kustannusjakauma, osien
kokonaiskustannus 31 798 €

Pysäyttävän raiteensulun kokonaiskustannukset vaihtelevat asennuspaikan mukaan.
Variaatiota kustannuksiin aiheuttavat asennuspaikasta riippuvat kaapelointimatkat,
asetinlaitekytkennät, asetinlaitteen turvalogiikan muunnokset ja mahdolliset vanhan
turvavaihteen purkukustannukset. Kappaleen 6.4 alussa on selvitetty asetinlaitteiden
toimintaa ja tekniikkaa. Kappaleessa 2.1.14 esitettyjä kustannuksia voidaan käyttää

hyvänä arviona, kun pysäyttävä raiteensulku asennetaan vanhan turvavaihteen tilalle, mutta muihin tilanteisiin kustannuksia ei voi yleistää.

Majajärven tapauksessa pysäyttävän raiteensulun asennuskustannukset (suunnittelu, materiaali, työtehtävät) olivat 26 058 €, eli 45 % kokonaiskustannuksista. Pysäyttävän raiteensulun hinta koostuu pitkälti vaihteenkääntölaitteesta ja hammas-tankomallisesta kääntömekanismista sekä laitteen asennuskustannuksista. Turvavaihteeseen verrattuna pysäyttävä raiteensulku on kustannuksiltaan edullinen vaihtoehto. Majajärven tapauksessa pysäyttävän raiteensulun hinta on 35 % turvavaihteen hinnasta.

Investointikustannusten lisäksi on myös syytä tarkastella kunnossapito- ja käyttökustannuksia. Turvavaihteen ja pysäyttävän raiteensulun kunnossapitotoimet ovat samankaltaisia: määräaikaistarkastuksia, öljyämistä, kääntölaitteen vuosi-huoltoa ja lämmitysjärjestelmän tarkastamista. Näiden töiden lisäksi turvavaihte vaatii mittauksia, tukikerroksen täydentämistä ja uusimista, tukemista ja oikomista, sekä vaihdepölkkyjen vaihtoa. Vaikka huoltotehtävät ovat osittain samankaltaisia, ovat turvavaihteen kunnossapidolliset työtehtävät moninkertaiset pelkästään turvavaihteen koosta johtuen. Vaikka turvavaihteen kunnossapitokustannukset ovat riippuvaisia vaihteen tyypistä, ovat ne suuremmat kuin pysäyttävällä raiteensululla. [42]

Turvavaihteen käyttökustannukset ovat myös pysäyttävää raiteensulkua suuremmat. Kummassakin laitteessa on samat energiaa kuluttavat komponentit, mutta vastussauvoja on vaihteessa pidemmällä matkalla. Kääntölaitteen vuotuinen energiankulutus on pieni verrattuna talvisiin kiskonlämmityskustannuksiin, joten käyttökustannuksia vertailtaessa on järkevämpää tarkastella vain lämmityskustannuksia. Turvavaihdetta ja pysäyttävää raiteensulkua joudutaan lämmittämään vastussauvoilla, jotta ne pysyvät talven ajan sulana ja toimintakuntoisina. Pysäyttävän raiteensulun vastussauvojen lämmitysteho on yhteensä 4 kW, kun taas vaihteiden lämmitystehot ovat selvästi suuremmat. Majajärven tapauksessa uusittu turvavaihte oli malliltaan YV54-200N-1:9. Kyseisen vaihdetyypin sulana pitäminen tukikisko- ja kielilämmityksellä vaatii tehoa 15,4 kW [43]. Arvioidaan lämmityksen vuotuiseksi käyttöajaksi 1 500 tuntia ja sähkön hinnaksi 8 snt/kWh. Pysäyttävän raiteensulun vuotuinen sulana pitäminen maksaa 480 €, kun taas kyseisen turvavaihteen lämmityskustannukset ovat 1848 €. 25 vuoden eliniällä ja 5 % vuotuisella hinnan nousulla laskettuna pysäyttävän raiteensulun käyttäminen turvavaihteen sijasta vähentää lämmityskustannuksia 65 290 € [44, s. 20].

5.2 Kääntömekanismi

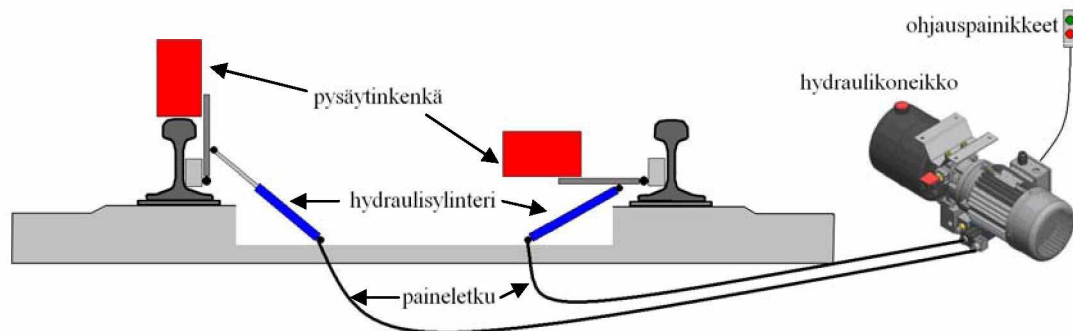
Pysäytinkien kääntäminen kiskoille on toteutettu Siemens S 700 K -kääntölaitteella ja Konepaja Mankisen suunnittelema ja valmistama hammas-tankomallisella kääntömekanismilla. Kääntömekanismi on luotettava ja kohtuullisen nopea. Sen kustannukset ovat noin 25 000 €, mikä on paljon suhteessa laitteen kokonaishintaan. Tässä kappaleessa on pohdittu konseptitasolla vaihtoehtoisia kääntömekanismeja, sekä niiden tuomia etuja ja haittoja.

Kokonaan uuden kääntömekanismin valmistaminen vaatisi paljon suunnittelua ja testaamista, jotta käännöstä saataisiin toimintavarma. Kääntömekanismin uudelleen suunnittelulla olisi kuitenkin mahdollista alentaa merkittävästi pysäyttävän

raiteensulun kokonaiskustannuksia. Pysäyttävällä raiteensululla pitäisi olla kohtuullinen kysyntä, jotta kääntömekanismin kehitykseen käytetyt resurssit realisoituisivat. Kääntömekanismin parantamista esiteltiin konseptitasolla tämän työn tilaajalle (Liikennevirasto), mutta asiaa ei nähty toistaiseksi tarpeellisenä. Tämän takia kääntömekanismin uudistamista ei esitellä syvällisesti tässä työssä.

5.2.1 Hydraulikoneikko

Kuva 34 on periaatepiirros hydraulikoneikolla toteutetusta pysäytinkenkien käännöstä. Hydraulikoneikko koostuu nestesäiliöstä, sähkömoottorista ja pumpusta. Hydraulikoneikolla tuotetaan painetta hydraulisylintereihin, jotka nostavat pysäytinkengät kiskoille. Pysäytinkenkien kääntöliike toteutettaisiin kahdella nestepaineen avulla liikkuvalla sylinterillä. Hydraulisylinterit voivat olla joko yksitoimisia, jolloin paluuliike toteutetaan jousella, tai kumpaankin suuntaan liikkuvia kaksitoimisia sylintereitä. Jos pysäyttäviä raiteensulkuja on samassa kohdassa vierekkäisillä raiteilla, riittää paineen tuottamiseen yksi hydraulikoneikko. Hydraulikoneikon sijaan vastaava kääntömekanismi voidaan toteuttaa myös pneumaattisena, jolloin voima välittyy nesteen sijasta ilman avulla.



Kuva 34 Hydraulikoneikon ja sylinterien avulla toteutettu pysäytinkenkien kääntö

Hydraulikoneikolla ja sylintereillä toteutettu kääntömekanismi toisi seuraavia etuja:

- hydraulikoneikon joustava sijoittelu vaihteenkääntölaitteeseen verrattuna
- yhden hydraulikoneikon mahdollisuus tuottaa painetta usealle pysäyttävälle raiteensululle
- alhaisemmat asennuskustannukset
- alhainen hinta verrattuna kääntölaitteeseen ja hammastankomalliseen kääntömekanismiin
- mahdollistaa normaalin pölkkyvälin.

Hydraulikoneikon mahdollisia haittoja ovat:

- vaikea kytkentä asetinlaitteeseen
- hydraulinesteen viskositeetin kasvu lämpötilan laskiessa
- suurempi huollon tarve.

5.2.2 Sähkösylinteri

Pysäyttävän raiteensulun pysäytinkenkien kääntö voidaan toteuttaa myös lineaarimoottorilla. Lineaarimoottori on vasta viime vuosina voimakkaasti yleistynyt sähkömoottori, jolla saadaan aikaan tarkasti ohjattua lineaarista liikettä ilman minkäänlaisia mekaanisia välitysosia. Eräs lineaarimoottorin sovellus on sähkösylinteri. Sähkösylinterin avulla voidaan helposti toteuttaa myös pysäyttävän raiteensulun kääntömekanismi. Sähkösylinterissä moottori on sylinterin sisällä, joten raiteen viereen ei tarvitsisi asentaa erillistä voiman tuottoa. Perinteisempi vaihtoehto

lineaarimoottorille on karamoottori, jossa vaihdemoottorin pyörivä liike muutetaan ruuvien ja mutterien avulla lineaariliikkeeksi. Markkinoilta löytyy lukuisia sähkösylintereitä, jotka on toteutettu joko lineaari- tai karamoottorilla. Koska sähkösylinterit ovat kokonsa puolesta pieniä ja kääntöön ei tarvita erillistä mekaniikkaa, ei ahdas pölkkyväli tuota asennusongelmia. Sähkösylinterit eivät vaadi tiuhaa huoltoa, mutta ne on suojattava hyvin lialta ja vedeltä.

5.3 Pysäytinkengän käyttäytyminen vaihteessa

Pysäyttävän raiteensulun pysäytinkengän kitkaelementti valmistetaan UNP 100 -teräsprofiilista, joka vulkanoituna istuu hyvin kiskolle. Kitkaelementti liukuu tukevasti jatkuvaa kiskoa pitkin, mutta vaihteessa pysäytinkengä suistaa päällään olevan kaluston. Kitkaelementin vulkanoidun uuman leveys on sovitettu kiskon leveyden mukaan, eikä se pysty liukumaan kiskolta toiselle (

Kuva 35, sivu 61).

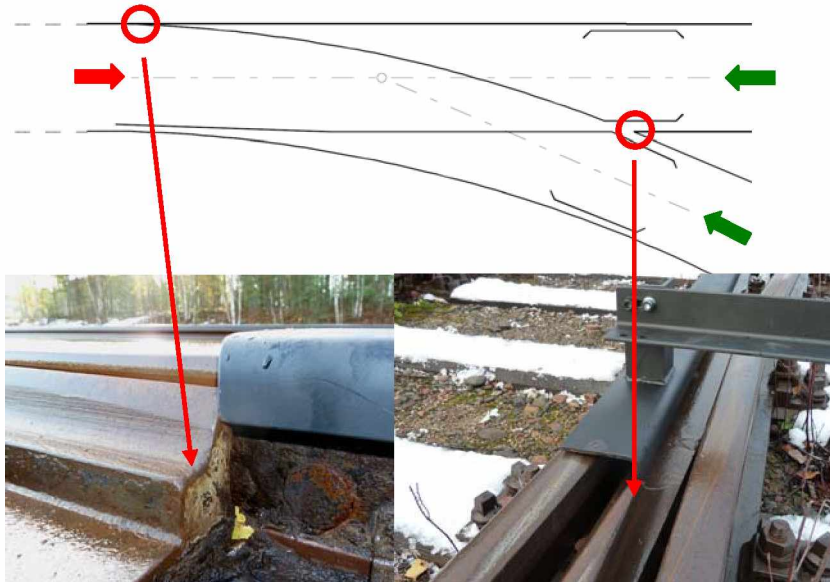


Kuva 35 U-profiilinen kitkaelementti kiskon ja vaihteen kielen päällä sekä kuva vaihteesta

Pohdittaessa pysäytinkengän käyttäytymistä vaihteessa, nousi esille idea vaihteen läpi liukumisen mahdollistavasta mallista. U-profiilin sijasta pysäytinkengän kitkaelementti voidaan valmistaa erikylkisestä kulmateräksestä, jolloin sillä on mahdollisuus liukua vaihteen läpi. Tätä ideaa päätettiin kokeilla yksinkertaisella käytännön kokeella. Otaniemen Design Factoryssa rakennettiin koelaitte, joka koostui kahdesta erikylkisestä kulmateräksestä, jotka kiinnitettiin toisiinsa vaakasitein. Koelaitteen on tarkoitus simuloida kahden pysäytinkengän ja törmäävän kaluston etummaisien pyöräkerran muodostamaa kokonaisuutta. Kokeet suoritettiin Hyvinkään ratapihalla YV-60-300-1:10-O ja YV-43-205-1:9-O vaihteissa.

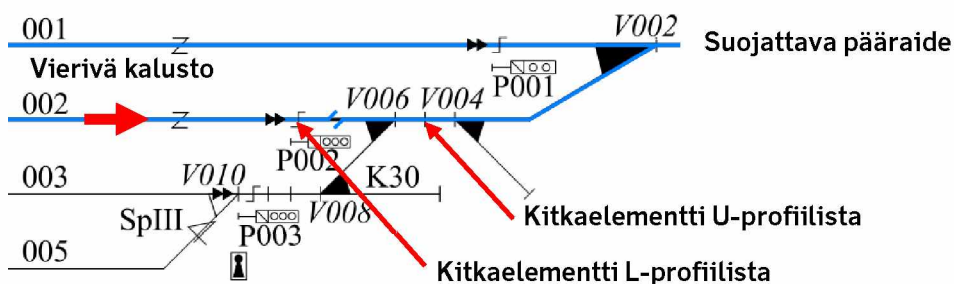
Kuva 36 sivulla 62 esittää L-profiilista valmistetun kitkaelementin käyttäytymistä vaihteessa. Myötävaihteen suuntaan (vihreä nuoli) erikylkisestä kulmaprofiilista valmistettu kitkaelementti liukui täysin ongelmitta, mutta vastavaihteen suuntaan (punainen nuoli) ilmeni kokeissa ongelmia. Vastavaihteeseen liukuessa kitkaelementin reuna saattaa törmätä vaihteen kielen kärkeen tai risteyksen kärkeen. Kyseinen ongelma saadaan korjattua kääntämällä kitkaelementin kyljen kulmaa ulospäin kiskon kyljestä. Taivutettu kitkaelementin kulma voi kuitenkin aiheuttaa ongelman vaihteen aukiajossa. Pysäytinkengän kitkaelementistä voidaan tapaus-

kohtaisesti valmistaa myötä- tai vastavaihteen läpi liukumisen mahdollistava malli. Kenttäkokeet suoritettiin yksinkertaisissa vaihteissa, joten niiden perusteella ei voi sanoa miten L-profiilista valmistettu kitkaelementti käyttäytyy kaksois- tai risteysvaihteessa.



Kuva 36 L-profiilisen kitkaelementin käyttäytyminen vaihteessa

Kuva 37 esittää Peräseinäjoen liikennepaikan osittaista raiteistokaaviota. Raiteella 002 olevan turvavaihteen V004 uusinta on mahdollista toteuttaa pysäyttävällä raiteensululla, mutta U-profiilisen kitkaelementin pysäytysmatka jää melko lyhyeksi. Pysäytysmatkaa saadaan kasvatettua, jos kitkaelementti voi liukua vaihteen V006 läpi. L-profiilista valmistettu kitkaelementti voidaan sijoittaa heti opastimen P002 jälkeen ja näin pysäytysmatkasta saadaan riittävä.



Kuva 37 L-profiilista valmistetun kitkaelementin tuoma hyöty sijoituspaikassa

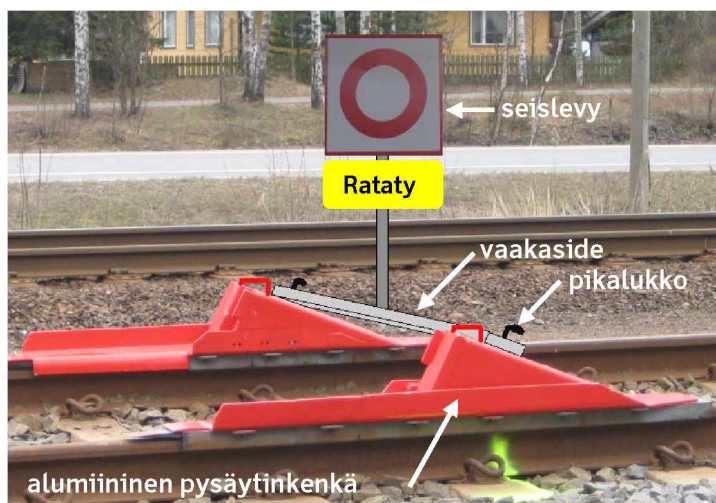
Liikkuvan kaluston on pystyttävä kulkemaan ilman erikoistoimenpiteitä 150 metrin säteisestä kaarteesta [45, s. 3]. Käytännössä kaarresäteet ovat suurempia, sillä rautatieliikennepaikkojen suunnitteluohjeiden mukaan alle 200 metrin kaarresäteiden käyttöä on vältettävä [39, s. 28]. Tarkastellaan pysäytinkien kulkua vaihteessa, jonka kaarresäde on 150 metriä. Kaarrevaihteissa käytetään kaarresäteen vaatimaa raidelevyyttä [46, s. 17]. 150 metrin kaarresäteessä raideleveys on 1534 mm, eli raidelevitys on 10 mm normaaliin verrattuna. Suuremmilla kaarresäteillä levitys on pienempi. [15, s. 19] 150 metrin säteisessä kaarteessa ulompi 1,6 m pitkä pysäytinkengän kitkaelementti oikaisee 2,2 mm kitkaelementin keskikohdasta mitattuna. Raiteen kunnossapitotasosta ja pyörien kulumisesta johtuen kiskon hamaran sisäkyljen ja pyörän laipan väli (raidevälitys) vaihtelee. Tästä vaihtelusta

johtuen raidelevityksellä tai kaarresäteestä johtuvalla kitkaelementin oikaisulla ei ole suurempaa vaikutusta pysäytinkien kulkuun kaarteissa.

Suoritettujen kokeiden mukaan vaihteen läpi liukuvan pysäytinkengän kitkaelementti voidaan valmistaa erikylkisestä kulmateräksestä. Kulmateräksinen kitkaelementti toimi hyvin yksinkertaisessa vaihteessa myötävaihteen suuntaan, mutta vastavaihteen suuntaan koelaitteen kanssa aiheutui ongelmia. Pääsääntöisesti pysäyttävällä raiteensululla suojataan sivuraiteen suunnasta pääraiteen liikennettä (Kuva 36, alempi vihreä nuoli). L-profiilista valmistetulla kitkaelementillä voidaan estää liian suuren liike-energian omaavan kaluston suistuminen pääraiteelle. Näin vältetään pitkiltä liikennekatkoilta ja suurilta kalustovaurioilta. Vaihteen läpi liukumisen mahdollistava pysäyttävä raiteensulku tulee sijoittaa paikkaan, jossa osittain vaihteen läpi vierinyt kalusto ei sulje koko liikennepaikan liikennettä. Uuden kitkaelementin käyttöönotto vaatii uusia kenttäkokeita, joissa oikeiden pysäytinkien toimintaa kokeillaan oikealla kalustolla. Tilapäiseen suojaukseen suunnitellun pysäyttävän raiteensulun kitkaelementti voidaan hyvin valmistaa erikylkisestä kulmaprofiilista. Tällöin kitkaelementin materiaaliarve vähenee ja paino laskee.

5.4 Tilapäiseen suojaukseen soveltuva pysäyttävä raiteensulku

Nykyiset turvalaiteratkaisut (suistava raiteensulku, turvavaihte, pysäyttävä raiteensulku ja erilaiset raidepuskimet) asennetaan kaikki kiinteästi tiettyyn kohtaan. Pysäyttävästä raiteensulusta on mahdollista valmistaa käsin siirrettävä versio, jota käytetään tilapäiseen suojaukseen (Kuva 38, sivu 64). Käsin siirrettävä pysäyttävä raiteensulku koostuu kahdesta kantokahvallisesta pysäytinkengästä ja pikalukkoilla kiinnitettävästä vaakasiteestä. Pikalukot ovat vastaavia, joita käytetään maastopyörän renkaiden ja satulan kiinnittämiseen, joten laitteen asentaminen onnistuu muutamassa minuutissa ilman työkaluja. Pysäytinkien välinen vaakaside toimii samalla jalustana tarvittaville merkeille. Tällainen merkki voisi olla seislevy ja/tai kunnossapidon lisäkilpi ja/tai vilkkuvalo [47].



Kuva 38 Tilapäiseen suojaukseen soveltuva pysäyttävä raiteensulku

Kuvan 38 mukainen pysäyttävän raiteensulun neljäs prototyyppi ei suoraan sovellu käsin siirrettäväksi, sillä yksi pysäytinkenä painaa yli 40 kg. Tilapäiseen suojaukseen

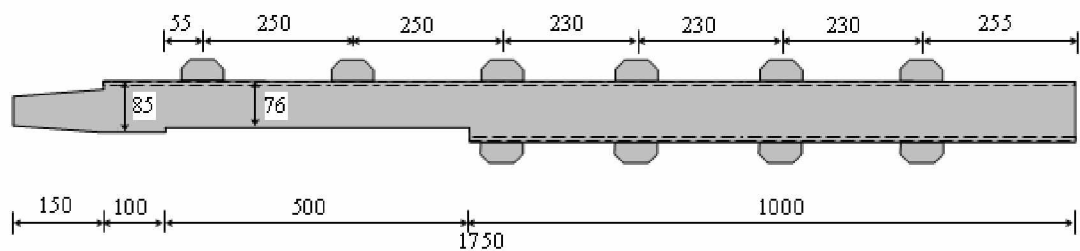
soveltuvan pysäyttävän raiteensulun yhden pysäytinkengän paino pitää saada niin kevyeksi, että yksi henkilö suoriutuu sen siirtämisestä työturvallisuutta vaarantamatta. Neljännestä pysäyttävän raiteensulun prototyypistä on karsittavissa materiaalia, jolla ei ole laitteen toiminnan kannalta merkitystä. Suuri painon kevennys saadaan aikaan valmistamalla pysäytinkenkä alumiinista. Esimerkiksi kitkaelementin valmistaminen erikylkisestä 100x50x6 alumiiniprofiilista UNP 100 -teräsprofiilin sijaan, laskee kitkaelementin painoa 13,1 kg. Alumiinista valmistetun pysäytinkengän paino on noin 15 kg, joten se on mahdollista nostaa yksin auton lavalta ja kantaa kiskolle. Puhtaan alumiinin lujuus on alhainen, mutta seostetut alumiinit yltyvät lujuudessaan rakenneterästen tasolle [48]. Konepaja Mankisen mukaan alumiinista valmistetun kaksisuuntaisen pysäytinkenkäparin kustannukset ovat 8 500 € [49]. Kustannuksia kasvattaa seostetun alumiinin työläämpi hitsaus verrattuna rakenneteräkseen. Kustannuksia on mahdollista laskea, jos pysäytinkengät suunnitellaan uudelleen käyttäen mahdollisimman paljon vakioprofiileja. Tilapäiseen suojaukseen soveltuvan pysäyttävän raiteensulun käyttömahdollisuuksia on pohdittu kappaleessa 6.2.4.

5.5 Pysäytinkenkien tuotantotekninen tarkastelu

Tässä kappaleessa on tarkasteltu pysäyttävän raiteensulun pysäytinkenkää ja kitkaelementtiä tuotantoteknisessä mielessä. Tarkastelun tarkoituksena ei ole muuttaa pysäyttävän raiteensulun toimintaa, vaan tuoda esille parannusehdotuksia, joiden avulla laitteen valmistaminen olisi elinkaarikustannuksia ajatellen mahdollisimman edullista.

5.5.1 Kitkaelementin rakenteen muuttaminen

Pysäyttävän raiteensulun kitkaelementti on varsin yksinkertainen osa, joka on valmistettu vulkanoidusta UNP 100 -teräsprofiilista (Kuva 39). Standardisoitu teräsprofiili on edullinen ja se on helppo vulkanoida. U-profiiliin on hitsattu kymmenen korvaketta kitkaelementin kiinnitystä varten. Törmäyksessä pysäytinkenkään tulee hyvin suuri isku ja sen takia pysäytinkenkään on suunniteltu olake, joka ottaa vastaan osan törmäysvoimista (Kuva 40). Useasta kitkaelementin kiinnitysruuvista johtuen, kitkaelementti on vaikea asentaa niin, että törmäysvoima kohdistuisi vain olakkeeseen. Pieni korvakkeiden asemointivirhe aiheuttaa sen, että törmäysvoima kohdistuu suoraan kiinnitysruuveille. Tällöin on vaarana, että ruuvit leikkautuvat poikki.



Kuva 39 Pysäyttävän raiteensulun kitkaelementti [8]

Kitkaelementin rakennetta pitäisi muuttaa siten, että törmäysvoima kohdistuisi kiinnitysruuvin sijasta olakkeeseen. Korvakkeet voidaan poistaa kokonaan, jolloin myös hitsattavien osien määrä laskee kymmenellä ja valmistuskustannukset laskevat. Kuva 40 esittää kitkaelementin kiinnityksen yksinkertaisempaa rakennetta. Keltaiset kahdeksankulmiot kuvaavat ruuvien paikkoja kannan suunnasta. Ruuvien puoleisen reiän on oltava riittävän suuri tai soikea, jotta törmäyksestä aiheutuva leikkausvoima ei kohdistu ruuveille vaan olakkeelle. Nykyinen kitkaelementti on valmistettu kuumavalssatusta UNP 100 -teräsprofiilista, jonka seinämän vahvuus on 6 mm. Kierteiden minimipituuden yleinen ohjesääntö on $0,8 \times$ kierteen halkaisija. Käytössä olevan seinämän vahvuuden perusteella M8 olisi sopiva ruuvien koko, mutta parempi pitävyys saavutetaan suuremmalla ruuvien halkaisijalla. Pysäyttävä raiteensulku on kiinnitetty kääntölaitteeseen kolmella 8.8 M10 ruuvilla, joiden yhteinen vetomyötöraja on 111,3 kN. Jos kitkaelementti halutaan kiinnittää yhtä lujasti pysäytinkenkään, tarvitaan sen kiinnittämiseen neljä kappaletta M10 8.8 ruuveja. [50] Kaksipuolisessa pysäytinkengässä kiinnitys voidaan toteuttaa kummaltakin puolen kengän edestä.

Toinen vaihtoehto on kiinnittää kitkaelementti uppokantaisilla ruuveilla kumin puolelta. Tämä kiinnitystapa vähentää kumin pinta-alaa ruuvien kantojen verran, mutta mahdollistaa vapaamman ruuvien sijoittelun. 8.12.2010 pidettiin kokous, jossa käsiteltiin pysäytinkengien rakenteen muuttamista. Kokouksessa päätettiin kiinnittää kitkaelementit kumin puolelta kuudella uppokantaisella 10.9 M10 ruuvilla (Kuva 40, vihreät kahdeksankulmiot).

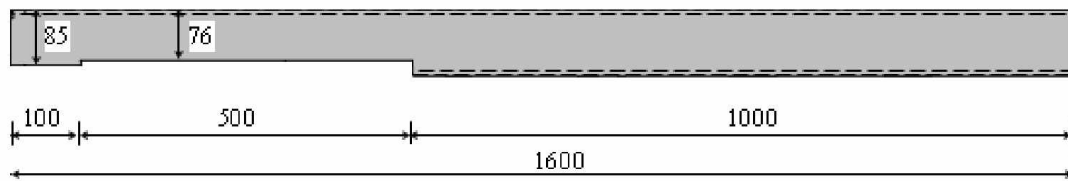


Kuva 40 Kitkaelementin kiinnityksen muutokset

Nykyisessä kitkaelementissä on olakkeelle pitkä paikka, joka riittää varsin hyvin törmäysvoiman vastaanottamiseen. Olake on törmäyssuuntaan nähden toispuoleinen, mikä saattaa aiheuttaa törmäyksessä leikkausvoimaa myös kitkaelementin kiinnitysruuveille. Koska Mäntyluodon pysäytyskokeissa käytettyjen kitkaelementtien kiinnitysruuvin asemoinnissa oli tapahtunut virhe, ei olakkeen toiminnasta saatu tietoa suurilla törmäysenergioilla. Lisätesteissä on varmistuttava nykyisen olakkeen

riittävästä törmäysvoiman siirrosta tai sitten pysäytinkenkään on suunniteltava toinen olake.

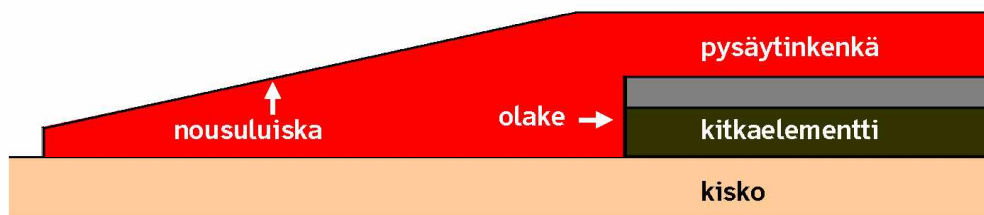
Nykyiseen kitkaelementtiin on valmistettu kaluston pyörälle nousuluiska (Kuva 39, sivu 65). Tämä nousuluiska voitaisiin vastaavasti valmistaa myös pysäytinkenkään, jolloin pysäyttävän raiteensulun elinkaarikustannukset alenisivat. Nousuluiskan teko on samanhintaista kumpaankin osaan, mutta pysäytinkengän suunniteltu elinikä (25 vuotta) on neljä kertaa pidempi kuin kitkaelementin. Pysäytinkenkään valmistettu nousuluiska voisi toimia samalla toisena olakkeena (Kappale 5.5.2). Nykyiseen rakenteeseen verrattuna esitetyt muutokset yksinkertaistaisivat kitkaelementin rakennetta ja samalla valmistuskustannukset alenisivat (Kuva 41).



Kuva 41 Kitkaelementin yksinkertaisempi rakenne

5.5.2 Pysäytinkengän rakenteen muutokset

Kappaleessa 5.5.1 esitettyjen kitkaelementin muutosten seurauksena myös pysäytinkengän rakenne muuttuu. Kuva 42 esittää pysäytinkengän ja kiskon poikkileikkauskuva. Tässä mallissa kitkaelementissä ei ole nousuluiskaa, vaan se on valmistettu pysäytinkenkään. Nousuluiska toimii myös törmäysvoiman siirtävänä olakkeena. Näin saadaan vähennettyä kitkaelementtien kiinnitysruuveille törmäyksessä kohdistuvaa leikkausvoimaa. 8.12.2010 pidetyssä kokouksessa päätettiin, että jatkossa pysäytinkengät valmistetaan kuvan 42 mukaisesti.



Kuva 42 Pysäytinkengän ja kiskon poikkileikkauskuva

Pysäyttävän raiteensulun pysäytinkengästä on mahdollista rakentaa versio, jossa pysäytinkengän toinen pää on pysäyttävä ja toinen pää suistava. Tämä versio olisi hyvin samanlainen kuin nykyinen yksisuuntainen pysäytinkenkä, mutta suistavaa päätä olisi muotoiltu suistavan raiteensulun tapaan. Tämä pysäytinkengän versio suistaisi kaluston haluttuun suuntaan, jos pysäyttävään raiteensulkuun törmätään väärästä suunnasta. Riihimäellä pysäyttävän raiteensulun yksisuuntaisiin pysäytinkengkiin törmättiin väärästä suunnasta ja kalusto suistui kiskoilta (2.1.12). Tämän yhden tapauksen perusteella ei voida varmuudella todeta, että toimiiko nykyinen yksisuuntainen pysäytinkenkä aina väärästä suunnasta suistavana. Vaikka yksisuuntainen pysäytinkenkä toimisi hyvin suistavana, ei sen suistosuunnasta ole tietoa. Pienellä yksisuuntaisen pysäytinkengän muotoilulla suistosta saadaan varmempi ja suistosuunnaksi voidaan valita turvallisempi puoli.

6 Pysäyttävän raiteensulun käyttöönotto

6.1 Käyttöpaikan vaatimukset

Pysäyttävä raiteensulku on oikein sijoitettuna yksinkertainen ja toimiva turvaratkaisu. Se ei kuitenkaan sovellu joka paikkaan, joten sen sijoittamisen on oltava tarkasti harkittua. Käyttökohteen on täytettävä seuraavat vaatimukset, jotta pysäyttävän raiteensulun käyttöä kannattaa harkita:

- Raide vaatii suojausta, mutta turvavaihdetta tai suistavaa raiteensulkua ei voida tai ei ole järkevä käyttää. Syy voi olla esimerkiksi tilan puute tai suistamisesta aiheutuva vaara.
- Pysäyttävä raiteensulku soveltuu vain vapaasti vierivän kaluston pysäyttämiseen. Jotta pysäyttäminen onnistuu, pitää pysäyttävään raiteensulkuun törmäävän kaluston olla vaunu. Vetokalustoa pysäyttävällä raiteensululla ei voida pysäyttää. Moottorijunista pysäyttävä raiteensulku soveltuu vain Sm3-kalustolle.
- Pysäyttävällä raiteensululla on oltava riittävä pysäytysmatka, joka on mitoitettava tapauskohtaisesti. Pysäytysmatka on riippuvainen raiteen pituuskaltevuudesta, kaluston kokonaispainosta, törmäävän vaunun akselipainosta ja törmäysnopeudesta.
- Keskitetysti ohjatun pysäyttävän raiteensulun läheisyydessä on oltava asetinlaite, jotta pysäytinkien automaattinen kääntö voidaan toteuttaa kustannusten puolesta järkevästi.

Pääsääntöisesti pysäyttävän raiteensulun pysäytinkengät ovat aina kaksisuuntaisia. Käytettäessä kaksisuuntaisia pysäytinkengiä vältetään turhilta kaluston suistumisilta. Joillakin liikennepaikoilla kaksisuuntainen pysäytinkengä voi lisätä turvallisuutta kumpaankin suuntaan. Tällöin on huolehdittava, että pysäyttävän raiteensulun molemmilla puolilla on riittävästi pysäytysmatkaa. Valmistamalla kitkaelementti erikylkisestä kulmateräsprofiilista, pystyvät pysäytinkengät liukumaan yksinkertaisen vaihteen läpi (Kappale 5.3). Tämä lisää pysäyttävän raiteensulun käyttömahdollisuuksia tietyissä tapauksissa.

6.2 Käyttökohteet

Pysäyttävä raiteensulku -projektin alkuvaiheessa pysäyttävän raiteensulun ainoaksi käyttökohteeksi suunniteltiin kuormauspaikan suojaamista mahdolliselta kaluston karkaamiselta. Pysäyttävä raiteensulku sijoitettaisiin kuormausraiteelle ja sillä estettäisiin kaluston luvaton pääsy pääraiteelle. Projektin edetessä alettiin miettiä myös muita mahdollisia käyttökohteita. Esille nousi pysäyttävän raiteensulun käyttäminen kohtausraiteilla. Kohtausraiteilla kulkuteiden sivusuojaukseen voidaan käyttää opastinta. Opastin antaa hyvän sivusuojan, jos kuljettaja tai vaihtotyönjohtaja havaitsee sen sekä noudattaa opastetta. Opastin ei kuitenkaan pysäytä vapaasti vieriviä vaunuja.

Kuten kappaleessa 2.1.13 kerrottiin, sattui tammikuussa 2010 Helsingin päärautatieasemalla onnettomuus, jossa neljä matkustajavaunua törmäsi raiteen päätepuskimeen ja toimistorakennuksen seinään. Onnettomuuden jälkeen alettiin

pohtia pysäyttävän raiteensulun käyttöä vastaavien onnettomuuksien ehkäisyssä. Yksi pysäyttävän raiteensulun käyttökohde voisi olla vaarallisten aineiden lastaus- tai seisontapaikka. Nykyisin käytössä oleva suistava raiteensulku soveltuu huonosti vaarallista ainetta sisältävien vaunujen pysäyttämiseen, sillä suistuva vaunu voi kaatua ja aiheuttaa vaaratilanteen. Lähtökohtaisesti pysäyttävän raiteensulun käytön pitää lisätä kohteen turvallisuutta tai tuoda selvää kustannusetua muihin turvalaiteratkaisuihin verrattuna.

6.2.1 Kohtausraide

Tässä kappaleessa tarkastellaan liikennepaikkaa, jossa on kohtausraide. Kohtausraiteen tehtävänä on mahdollistaa joustava liikennöinti. Kohtausraide on tarkoitettu yksiköiden kohtaamisiin ja ohituksiin. Kaikki Suomen tärkeimmät radat on varustettu junien kulunvalvonnalla (JKV). Kulunvalvontajärjestelmällä varmistetaan junan kullakin hetkellä sallitun suurimman nopeuden sekä junan kulkuun vaikuttavien opasteiden noudattaminen. Kulunvalvontajärjestelmän avulla seurataan junan nopeutta, jarrutuskykyä ja kuljettajan reagoimista annettuihin ohjeisiin. Jos juna liikkuu ylinopeutta, laitteisto kehottaa vähentämään nopeutta. Ellei kuljettaja alenna junan nopeutta, kulunvalvontajärjestelmä tekee automaattisen jarrutuksen. [2, s. 148–153] [51] Kuljettaja ei voi ohittaa kulunvalvontajärjestelmää, eikä sivuraiteella olevaa junaa voi siten ajaa vahingossa pääraiteelle.

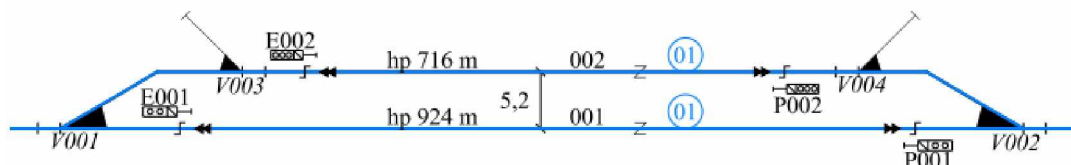
Mahdollinen vaaratilanne voi syntyä, kun seisonnassa tai vaihtotyössä oleva kalusto karkaa kohtausraiteelta vierien kohti viereistä junakulkutietä. Ratateknisten ohjeiden mukaan junakulkutiellä on oltava sivusuoja, joka suojaaa varmistettua junakulkutietä. Sivusuojan voi antaa vaihde, raiteensulku tai Seis-opastetta näyttävä pää- ja/tai raideopastin. Ohjeiden mukaan sivusuojana on ensisijaisesti käytettävä vaihdetta tai raiteensulkua ja toissijaisesti pää- ja/tai raideopastinta. [38] Turvavaihdetta on käytettävä, kun raiteen keskimääräinen pituuskaltevuus käyttöpituuden matkalla tai 200 m ennen käyttöpituuden rajaavaa opastinta on jyrkempi kuin -2,5 ‰ turvattavan raiteen suuntaan [39]. Kuten kappaleessa 4.1 on esitetty, kaluston vapaa vieriminen on myös mahdollista loivemmillä raiteen kaltevuuksilla.

Pysäyttävä raiteensulku on mahdollista määritellä ratateknisiin ohjeisiin uudeksi turvalaitteeksi, jota käytetään sivusuojana liikennepaikoilla, joissa on kohtausraide ja joissa kaluston on mahdollista vierä viereiselle raiteelle. Laitteen määrittely voidaan tehdä nykyisten turvavaihteen sijoitusohjeiden mukaisesti kolmella eri tavalla. Pysäyttävää raiteensulkua on käytettävä, kun raiteen keskimääräinen pituuskaltevuus käyttöpituuden matkalla tai 200 m ennen käyttöpituuden rajaavaa opastinta on

1. jyrkempi kuin I , mutta loivempi kuin -2,5 ‰
2. jyrkempi kuin -2,5 ‰ tai
3. jyrkempi kuin I .

Yllä olevissa määrittelyissä I on raiteen pituuskaltevuus, joka on kaluston vierimään lähtemisen raja-arvo. Ensimmäisessä vaihtoehdossa pysäyttävä raiteensulku määriteltäisiin uudeksi turvalaitteeksi, jota käytettäisiin loivemmillä kaltevuuksilla kuin turvavaihdetta. Toisessa vaihtoehdossa pysäyttävä raiteensulku määriteltäisiin turvalaitteeksi, jota käytettäisiin turvavaihteen vaihtoehtona nykyisten ohjeiden mukaisesti. Kolmas vaihtoehto on määritellä pysäyttävä raiteensulku turvalaitteeksi, joka toimisi sekä turvavaihteen rinnalla nykyisten ohjeiden mukaisesti että uutena turvalaitteena loivemmillä kaltevuuksilla.

Kuva 43 esittää vanhojen mitoitusohjeiden mukaan rakennettua liikennepaikkaa, jossa turvavaihteet antavat suojaa kumpaankin suuntaan. Kyseisen liikennepaikan raiteen pituuskaltevuus on $-2,0\text{‰}$ vaihteen V001 suuntaan. Nykyisten mitoitusohjeiden mukaan molemmat turvavaihteet voidaan poistaa, sillä raiteen pituuskaltevuus on loivempi kuin $-2,5\text{‰}$. Liikennepaikan raiteen pituuskaltevuuden takia kalusto voi kuitenkin vieräjä pääraiteelle. Määrittelemällä pysäyttävä raiteensulku kohtien 1 tai 3 tavalla, kuvan mukaiselta liikennepaikalta poistuisivat kummatkin turvavaihteet (V003 & V004) ja opastimen E002 jälkeen asennettaisiin pysäyttävä raiteensulku.



Kuva 43 Kohtausraide

Pysäyttävä raiteensulku tulee sijoittaa heti opastimen takana olevan raide-eristyksen taakse, jotta pysäytysmatkasta saadaan mahdollisimman pitkä. Pysäyttävän raiteensulun sijoittamisesta on esitelty tarkemmin kappaleessa 6.3. Ratateknisten ohjeiden mukaan pääopastin on sijoitettava vähintään 60 metrin päähän kulkutievaihteen rajamerkistä [38]. Pysäyttävän raiteensulun mahdollinen käyttöönotto tulee aloittaa sellaisilla kohtausraiteilla, jossa opastimen etäisyys kulkutievaihteen rajamerkkiin on selvästi minimivaatimusta enemmän. Opastimen siirto pysäytysmatkan kasvattamiseksi on myös mahdollista, mutta tällöin raiteen käyttöpituus lyhenee ja opastimen siirrosta aiheutuu ylimääräisiä kustannuksia sekä liikenteen seisautuksia. Pysäyttävä raiteensulku on mahdollista asentaa junakulkutielle toisin kuin suistava raiteensulku.

Pysäyttävä raiteensulku ei sovellu vetokaluston pysäyttämiseen lukuun ottamatta Pendolinoa, joten se ei tuo lisäturvaa junien kohtauksiin ja ohituksiin. Junien kohtauksissa turvaa tuo junien kulunvalvonta. Pysäyttävän raiteensulun avulla voidaan estää kohtausraiteelta seisonnasta tai vaihtotyöstä vierimään lähteneiden vaunujen pääsy viereiselle raiteelle.

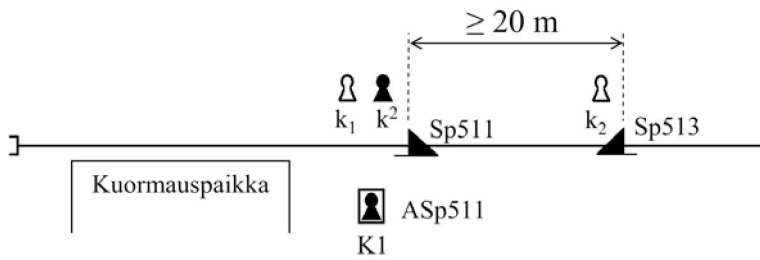
6.2.2 Kuormauspaikka

Tavaraliikenteen kuljetukset Suomen rautateillä jakautuvat tuoteryhmittäin seuraavasti: mekaaninen metsäteollisuus 40 %, kemiallinen metsäteollisuus 20 %, metalliteollisuus 20 %, kemianteollisuus 19 % ja muut 1 %. Liikenneviraston hallitsemiin kuormauspaikkoihin kuuluvat etupäässä raakapuun kuormauspaikat. Suurin osa Suomen rataverkolla olevista kuormauspaikoista on tuotantolaitoksien yksityisraiteilla. [52] Näillä paikoilla liikennöinnistä ja kuormauksesta vastaa yleensä raiteiden omistaja.

Kuormauspaikalta vaadittava suojaus

Liikenneviraston ohjeiden mukaan kuormauspaikka tulee suojata raiteensululla kummastakin suunnasta kuvan 44 mukaisesti. Kuormauspaikalta pois lähtevän liikenteen estävää raiteensulkua ei tarvita, jos kuormauspaikan raiteella on nousua koko matkan. Kuormauspaikan raiteensulut tulee varustaa varmistuslukolla. Kuormauspaikan varmistuslukkolaitoksen raiteensulkuja voidaan käyttää kulkutievaihteen suojaamiseen, jos raiteensulkujen käyttöavaimet on ketjutettu kuormaus-

laitteistoon ja turvalaitokseen kytkettyyn avainsalpalaitteeseen sekä etäisyysvaatimukset täyttyvät. [38]

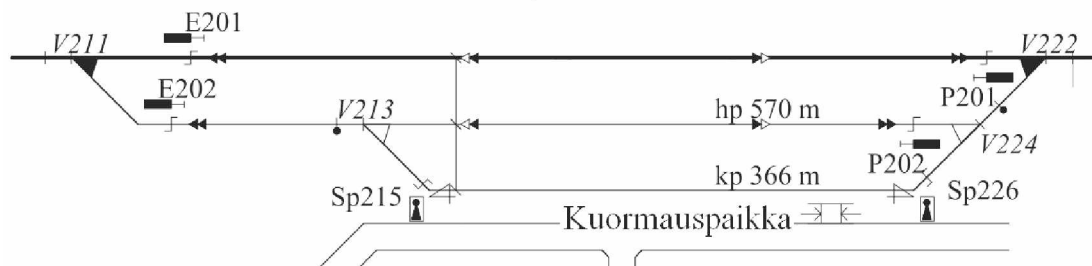


Kuva 44 Kuormauspaikan suojaaminen [38]

Kyseisen kuormauspaikan suojausjärjestelmä on mahdollista toteuttaa myös yhdellä kaksisuuntaisella keskitetysti ohjatulla pysäyttävällä raiteensululla. Kaksisuuntaisen pysäyttävän raiteensulun avulla voidaan estää kuormauksessa olevien vaunujen karkaaminen sekä muun kaluston luvaton pääsy kuormauspaikalle. Kaikki kuormauspaikat eivät kuitenkaan ole kyseisen kuvan mukaisia, vaan ne vaihtelevat riippuen kuormattavasta materiaalista.

Raakapuun kuormauspaikka

Suomen rataverkolla on aktiivisessa käytössä noin 125 raakapuun kuormauspaikkaa. Suomessa on yhteensä yhdeksän raakapuuterminaalia, joissa on erillinen kuormauspalvelu. Suurin osa Suomen raakapuun kuormauspaikoista on pieniä liikennepaikkoja, joissa ei ole erillistä kuormauspalvelua. [53] Kuva 45 esittää tyypillistä raakapuun kuormauspaikkaa. Raakapuun kuormaus on suojattu raiteensuluilla kummastakin suunnasta. Kuormausraiteen raiteensulut ovat käsikäyttöisiä ja niiden tilaa valvotaan avainsalpalaitteella. Käsikäyttöisen raiteensulun korvaaminen keskitetysti ohjatulla pysäyttävällä raiteensululla ei ole kustannusten takia kannattavaa. Pysäyttävä raiteensulku ei sovellu kuvan mukaisille kuormausraiteille, sillä vaadittava pysäytysmatka lyhentää jo entisestään lyhyttä raiteen käyttöpituuutta. Vastaavat kuormausraiteet ovat usein myös niin hiljaisia, että kyseisille raiteille riittää hyvin käsikäyttöinen sivusuoja.



Kuva 45 Raakapuun kuormauspaikka

Pysäyttävän raiteensulun käyttöä kannattaa pohtia suunnitteilla oleville raakapuun kuormauspaikoille, joissa on tarpeeksi pysäytysmatkaa. Pysäyttävän raiteensulun etuna on, että pysäyttämisestä ei aiheudu juurikaan kustannuksia, toisin kuin kaluston suistamisessa. Vilkkaille kuormauspaikoille, joissa pysäytinkengät kääntyvät usein kiskoille, kannattaa asentaa keskitetysti ohjattu pysäyttävä raiteensulku, jottei aikaa ja siten myös kustannuksia mene hukkaan.

Yksityisraiteen kuormauspaikka

Liikenneviraston hallinnoiman rataverkon lisäksi Suomessa on useita yksityisraiteita, joita hallinnoi yksityinen yritys, kunta tai jokin muu taho. Yksityisraiteen haltijalla on vastuu omasta raiteestaan, mutta sen turvallisuutta valvoo Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi. [54]

Yksityisraiteiden kuormauspaikkojen suojaus on käytännössä hyvin kirjavaa. Haastattelun perusteella pysäyttävällä raiteensululla voisi olla käyttöä vaativilla kuormauspaikoilla [55]. Esimerkiksi vaarallisten aineiden kuormauspaikka voisi olla hyvä suojata pysäyttävällä raiteensululla. Teollisuusalueiden liikenne on rauhallista, joten pysäyttävästä raiteensulusta kannattaa valmistaa käsikäyttöinen versio, joka on kustannuksiltaan edullisempi kuin nykyinen keskitetysti ohjattu pysäyttävä raiteensulku.

6.2.3 Vaarallisten aineiden kuljetus

Perinteinen raiteensulku on kaksitoiminen. Hyvin hiljaisella nopeudella raiteensulku pyrkii pysäyttämään liikkuvan kaluston ja suuremmilla nopeuksilla se suistaa kaluston kiskoilta. Ilmeinen vaaratilanne syntyy siitä, kun suistavaan raiteensulkuun törmäävä vaunu sisältää vaarallista ainetta. Seuraava tapausesimerkki on Onnettomuustutkintakeskuksen raportista: *Siilinjärvellä Kemira GrowHow Oyj:n ratapihalla tapahtui lauantaina 4.8.2007 kello 6.24 onnettomuus, jossa kuormassa ollut typpihappovaunu suistui raiteensulussa kiskoilta ja kaatui. Onnettomuuden syynä oli se, että raiteensulkua ei ollut poistettu ennen vaunujen työntämistä raiteelle ja se, että päälle jäänyttä raiteensulkua ei havaittu ajoissa.* [56]

Onnettomuustutkintakeskus suositti edellä esitetyn tapaturman välttämiseksi, että ratapihoilla, joilla käsitellään vaarallisia aineita, tulisi raiteensululla ja raiteelle johtavalla vaihteella olla keskinäinen riippuvuus [56]. Tämä riippuvuus voidaan toteuttaa esimerkiksi keskitetysti ohjatulla pysäyttävällä raiteensululla. Pysäyttävän raiteensulun vahvuus verrattaessa vanhaan suistavaan raiteensulkuun on juuri edellisen esimerkin kaltaisissa onnettomuuksissa, joissa raiteensulkuun törmätään vahingossa, esimerkiksi vaunujonoa työnnettäessä. Pysäyttävään raiteensulkuun törmäminen ei aiheuta vaaratilannetta, joten se soveltuu vaarallista ainetta sisältävien vaunujen pysäyttämiseen. Jos pysäyttämiseen käytetään turvavaihdetta tai suistavaa raiteensulkua, on vaunujen kaatuminen mahdollista. Pysäyttävän raiteensulun pysäytinkien kääntö tulee toteuttaa liikennepaikan liikenteen vilkkauden mukaan. Keskitetysti ohjattu pysäyttävä raiteensulku soveltuu hyvin vilkkaille liikennepaikoille, kun taas käsikäyttöinen pysäyttävä raiteensulku soveltuu paikkoihin, joissa liikenne on harvaa.

6.2.4 Ratatyö

Kappaleessa 5.4 on esitetty tilapäiseen suojaukseen soveltuva pysäyttävä raiteensulku. Vastaava suojausratkaisu on ollut jo 20 vuotta käytössä ratatyömailla. Tämä suoja on koostunut kahdesta teräspuomilla yhteen hitsatusta kiskokengästä ja seislevystä. Laite on kiinnitetty kettingillä kiskoon. [57] Toiminnaltaan laite on täysin vastaava kuin pysäyttävä raiteensulku, mutta pysäytysteholtaan heikompi, sillä kahden teräspinnan välinen liukukitkakerroin on alhaisempi kuin teräksen ja kumin välinen liukukitkakerroin.

Radanpidon turvallisuusohjeet määräävät ratatyöstä vastaavan henkilön varmistamaan ratatyön suojaaminen. Suojaustoimenpiteistä on sovittava liikenteenohjauksen kanssa. Työalue tulee erottaa ja merkitä esimerkiksi lippusiimalla, suoja-aidalla tai muulla sopivalla rakenteella. Erottamista ei kuitenkaan vaadita, jos työ on lyhytkestoista tai työalue on liikkuva. Lisäksi oikosulkujohtimia on käytettävä ratatyössä aina, kun se on mahdollista. [58] Suomen rataverkolla on käytössä kaksi tekniikkaa, joilla valvotaan raideosuuksien vapaanaoloa: raidevirtapiiri ja akselinlaskenta. Raidevirtapiirissä raideosuuden toisesta päästä syötetään kiskoihin jännitettä, joka vapaana olevan raideosuuden päässä havaitaan releen avulla. Jos raideosuudelle saapuu kalusto, kaluston pyöräkerta varaa raideosuuden ja releen asento vaihtuu. Oikosulkujohtimen avulla raidevirtapiiriin perustuva raideosuus voidaan varata työmaakäyttöön. Akselinlaskentajärjestelmässä verrataan rataa asennettujen akselinlaskijoiden välille menneiden ja sieltä poistuneiden akseleiden lukumäärää. Mikäli tietyllä välillä on mennyt enemmän akseleita kuin sieltä on poistunut, raideosuus muuttuu varatuksi. Akselinlaskentaan perustuvalla raideosuudella oikosulkujohtimien käytöstä ei ole hyötyä. [2, s. 142–143]

Pääsääntöisesti työmaat saadaan suojattua ulkopuoliselta vaaralta kääntämällä vaihteet toisaalle ja lukitsemalla asento kielisalvalla [59]. Aina työmaan suojaaminen ei ole mahdollista. Lippusiimat tai suoja-aidat eivät anna minkäänlaista suojaa työmaan työntekijöille uhkaavasti työmaata lähestyvää kalustoa vastaan. Käsien siirrettävä pysäyttävä raiteensulku ei muuta tai poista vanhoja turvallisuusratkaisuja, mutta tuo yhden suojan lisää. Se soveltuu hyvin pidempikestoisille kiinteille työmailla. Jos ratatyö kestää useamman vuorokauden, on pysäytinkengät lukittava kiskoihin ilkeiden estämiseksi. Liikkuville tai hyvin lyhytaikaisille ratatyömailla käsien siirrettävä pysäyttävä raiteensulku ei sovellu. Haastattelun perusteella tilapäiseen suojaukseen soveltuvalle pysäyttävälle raiteensululle on tarvetta erityisesti ratapihatyömailla. Turvallisuusongelmia voi ilmetä ratapihatyömaalla, jossa vaihtotyöhenkilöstö ei ole tottunut työskentelemään rakentamisen alaisella alueella. [60] Tilapäiseen suojaukseen soveltuvan pysäyttävän raiteensulun voisi ottaa aluksi kokeiluun pääsolmuraatapihoilla Tampereella ja Kouvolassa. Jos laitteelle olisi näillä liikennepaikoilla käyttöä ja se koettaisiin hyödylliseksi, sen käyttöä voitaisiin laajentaa perussolmuraatapihoille (Turku, Riihimäki, Seinäjoki, Jyväskylä, Imatra, Joensuu, Pieksämäki, Oulu, Kontiomäki, Kemi ja Tornio) [61].

6.2.5 Helsingin päärautatieasema

5.10.1990 saapui raskas tavarajuna Turusta Helsinkiin. Junan kokonaispaino oli 1800 tonnia ja pituutta sillä oli noin 700 metriä. Juna ajettiin Pasilassa raiteelle 211, jossa vaunujen väliset jarruletkut irrotettiin ja ruuvikytkimet löysättiin. Tämä tehtiin sen takia, jotta vaunut saataisiin nopeasti irti toisistaan laskumäessä. Dieselveturin Dr14 lähti työntämään vaunuja kohti laskumäkeä. Normaalisti raiteelta 211 pääsee suoraan raiteen 248 kautta laskumäkeen, mutta kiskonvaihtotöiden takia vaunut jouduttiinkin ajamaan toista kautta. Alun jyrkähkön ylämäen jälkeen rata muuttuu alamäeksi, jonka pituuskaltevuus on keskimäärin -9,5 ‰. Tässä alamäessä pelkän veturin jarrut eivät enää riittäneet vauhdin hiljentämiseen. Lopulta vaunut törmäsivät raiteen 009 päätepuskimeen nopeudella 20 km/h. Törmäyksessä ensimmäinen vaunu nousi päätylaiturille ja meni asemahallin ovien läpi. Muut vaunut kasautuivat raiteen päähän. Tapahtuneesta selvitettiin ilman henkilövahinkoja, mutta taloudelliset kustannukset olivat suuret. [62]

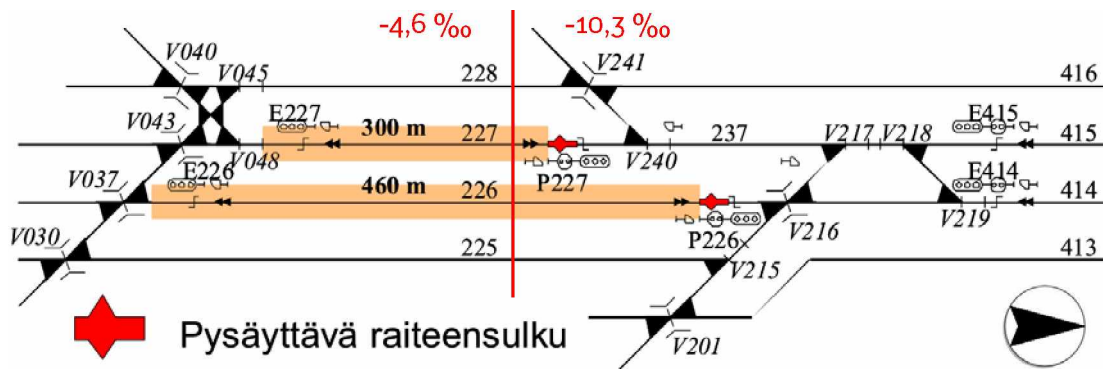
Nykyisin Helsingin päärautatieasemalla ei enää nähdä tavarajunia, sillä Helsinkiin päätyvä tavaraliikenne on ohjattu Vuosaaren satamaan. Vaikka kahdessa vuosikymmenessä on tapahtunut paljon muutoksia, ovat onnettomuudet Helsingin päärautatieasemalla edelleen mahdollisia. Helsingin päärautatieasema on korkeusasemansa suhteen poikkeuksellinen, sillä alle kolmen kilometrin matkalla kohti Pasilaa ja Ilmalaa, tulee nousua noin 20 metriä. Ilmalan varikko on Suomen henkilöliikenteen keskus, jossa huolletaan, varustetaan ja kootaan kaikki lähiliikenteen junat ja valtaosa kaukoliikenteen kalustosta. Suuren vaihtotyömäärän ja raiteen pituuskaltevuuden takia on Helsingin asemalla varauduttava jatkossakin vaunujen karkaamisten aiheuttamiin onnettomuuksiin.

27.5.2010 pidettiin neuvottelu, jonka tarkoituksena oli selvittää pysäyttävän raiteen-sulun käyttömahdollisuuksia Helsingin päärautatieaseman suojaukseen. Neuvotte-luiden ja maastokatselmuksen perusteella päädyttiin kolmeen eri vaihtoehtoon:

1. Kaksi raiteensulkua raiteille 226 ja 227
2. Neljä raiteensulkua raiteille 012–015
3. Kahdeksan raiteensulkua raiteille 004–011

Eri vaihtoehdot ja Helsingin raiteistokaavio on esitetty liitteessä 5. Esitetyistä vaihtoehdoista valittiin lopulta ensimmäinen vaihtoehto, sillä se tarjosi kustannustehokkaan ratkaisun ja riittävän pysäytysmatkan. Kuva 46 esittää Helsingin ratapihalle tulevien pysäyttävien raiteensulkujen paikat. Raiteet 226 ja 227 ovat Töölönlahden eteläpään kohdalla. Raiteet ovat Ilmalan varikon huoltoraiteita, joten niiden kautta liikkuu paljon kalustoa. Todennäköisesti karkaaminen sattuu lähempänä Ilmalan varikkoa, joten asentamalla pysäyttävä raiteensulku näille kahdelle saattoraiteelle voidaan estää suurin osa Helsingin asemaa uhkaavista karkaamisista. Raiteella 227 pysäytysmatkaa on noin 300 metriä ja raiteella 226 460 metriä. Pysäytysmatkan alkuosalla raiteen pituuskaltevuus on -10,3 ‰ loiventuen loppuosasta -4,6 ‰:een. Pysäyttävien raiteensulkujen asennus kuvan mukaisille raiteille pyritään tekemään vuoden 2010 aikana. [23] Asennettavat pysäytinkengät ovat yksisuuntaisia, sillä jos pysäytinkengät ovat väärään aikaan kiskoilla ja niihin törmätään etelästä, on mahdollista, että kalusto suistuu törmätessään pysäytinkenkiin. Käyttämällä kaksisuuntaisia pysäytinkenkiä, kalusto suistuu joko vaihteessa V240 tai V216. Yksisuuntaisia pysäytinkenkiä avulla on mahdollista, että väärästä suunnasta törmäävä kalusto suistuu ennen vaihdetta ja näin säästytään vaihteen korjauskustannuksilta.

Kuvan 46 vaihde V240 on mallia YV60-300-1:9-O (yksinkertainen vaihde). Valmistamalla kitkaelementti erikylkisestä kulmateräksestä, pystyisivät raiteen 227 pysäytinkengät liukumaan vaihteen V240 läpi, jos niihin törmätään vahingossa etelän suunnasta (Kappale 5.3). Tällöin raiteen 227 pysäytinkengät olisi syytä vaihtaa kaksisuuntaisiksi. Sen sijaan raiteella 226 kulmateräksinen kitkaelementti ei tuo etua, sillä vaihde V216 on mallia KRV54-200-1:9 (kaksipuolinen risteysvaihde). Eriky-lkisestä kulmateräksestä valmistetun kitkaelementin käyttäytymistä kaksipuolisessa risteysvaihteessa ei ole tutkittu. Raiteella 226 voitaisiin käyttää pysäytinkengän versiota, jossa toinen pää on pysäyttävä ja toinen suistava (5.5.2). Tällöin suistosuunta on mahdollista suunnitella etukäteen.



Kuva 46 Helsingin ratapihalle tulevat raiteensulut [23]

Kuva 32 sivulla 57 esittää pysäyttävän raiteensulun pysäytysmatkaa Helsingin ratapihalla. Tarkastelussa törmävän vaunun akselipaino on 142 kN ja raiteen keskimääräinen pituuskaltevuus on $-7,0 \text{ ‰}$ liikkeen suuntaan. Kuusi yksikerroksista InterCity-vaunua painaa noin 300 tonnia [40]. Pysäytysmatkakuvaajan perusteella 300 tonnia painavan kaluston pysäyttäminen 30 km/h nopeudesta vaatii pysäytysmatkaa noin 125 metriä (Kuva 32). Helsinkiin asennettavilla pysäyttävillä raiteensuluilla olisi voitu estää tammikuussa 2010 tapahtunut onnettomuus. Pitkän pysäytysmatkan ansiosta laitteilla on hyvät toimintaedellytykset, vaikka liukukitka-kerroin puolittuisi.

6.2.6 Parkanon radan turvavaihteiden uusiminen

Tässä kappaleessa tarkastellaan Tampereen ja Seinäjoen välisten liikennepaikkojen (Parkanon rata) turvavaihteiden uusimista. Kaikille Parkanon radan liikennepaikkojen kohtausraiteille rakennettiin turvavaihteet kumpaankin suuntaan silloisten ohjeiden mukaisesti (Kuva 43). Parkanon radan liikennepaikat varustettiin vaihteilla vuosina 1989–1996, joten niiden uusiminen tulee ajankohtaiseksi 2010-luvulla. Voimassa olevat rautatieliikennepaikan mitoittamisohjeet edellyttävät turvavaihteen käyttöä, kun raiteen keskimääräinen pituuskaltevuus käyttöpituuden matkalla tai 200 m ennen käyttöpituutta rajaavaa opastinta on alle $-2,5 \text{ ‰}$ turvattavan raiteen suuntaan. Taulukko 17 esittää Parkanon radan liikennepaikkojen turvavaihteita, joita edeltävän sivuraiteen pituuskaltevuus turvattavan raiteen suuntaan on jyrkempi kuin $-1,0 \text{ ‰}$, mutta loivempi kuin $-2,5 \text{ ‰}$. Mitoitusohjeiden mukaan kyseiset liikennepaikat eivät vaadi turvavaihteiden käyttöä. Kuten kappaleissa 2.1.7 ja 4.1 on esitetty, kaluston vapaa vieriminen on mahdollista myös loivemmilla kuin $-2,5 \text{ ‰}$ raiteen pituuskaltevuuksilla.

Taulukko 17 Parkanon radan turvavaihteet, raiteen keskimääräinen pituuskaltevuus on jyrkempi kuin -1,0 ‰, mutta loivempi kuin -2,5 ‰ turvattavan raiteen suuntaan

Liikennepaikka	Raide	Vaihte	Pituuskaltevuus (‰)	Pysäytysmatka (m)
Ylöjärvi	002	V003	-2,0	116
Lakiala	002	V004	-2,1	135
Majajärvi	002	V004	-2,0	140
Karhejärvi	002	V006	-2,0	132
Karhejärvi	003	V008	-2,0	152
Sisättö	002	V003	-2,1	133
Vahojärvi	002	V003	-2,0	134
Vahojärvi	003	V004	-2,0	133
Poikkeus	002	V003	-2,0	134
Lamminkoski	002	V003	-2,0	124
Lamminkoski	003	V004	-2,0	124
Kuivasjärvi	002	V006	-2,0	123
Kuivasjärvi	003	V008	-2,0	147
Ratikylä	002	V003	-1,8	126
Madesjärvi	002	V006	-1,0	125
Madesjärvi	003	V008	-1,0	147
Ylivalli	002	V004	-1,0	124
Jalasjärvi	002	V005	-1,6	146
Jalasjärvi	003	V007	-1,6	165
Peräseinäjoki	002	V004	-2,0	158

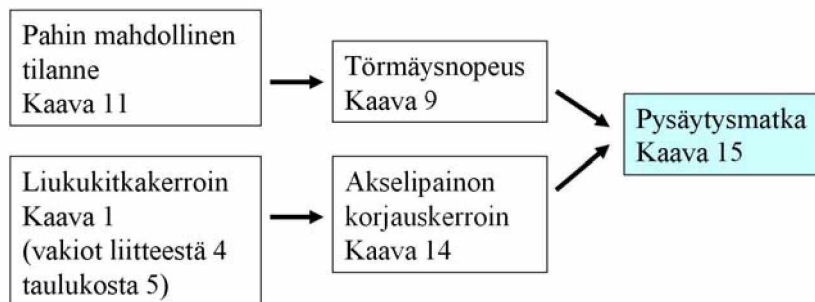
Parkanon radalla on 20 turvavaihdetta, jotka turvaavat pääraidetta mahdollisilta vaunujen karkaamisilta. Turvavaihteiden käyttöön päätyttyä kyseiset turvavaihteet on mahdollista korvata pysäyttävillä raiteensuluilla. Parkanon radan liikennepaikat soveltuvat hyvin pysäyttävän raiteensulun käyttöön, sillä pysäytysmatkat opastimelta turvattavan vaihteen rajamerkille ovat 116–165 metriä. Taulukko 18 esittää Parkanon radan turvavaihteiden uusimisen kustannuksia. Kustannukset on laskettu Pysäyttävän raiteensulun kustannusvertailu -raportin tietojen perusteella (Kappale 2.1.14). Pysäyttävän raiteensulun avulla voidaan jatkaa Parkanon radan liikennepaikkojen turvallisuutta kaluston karkaamisilta turvavaihdetta edullisemmin kustannuksin. Junien kohtaamisiin ja ohituksiin pysäyttävä raiteensulku ei anna lisäsuojaa, sen antaa junien automaattinen kulunvalvontajärjestelmä.

Taulukko 18 Parkanon radan turvavaihteiden uusimiskustannukset (20 kpl)

	Pysäyttävä raiteensulku	Kierrätetty turvavaihte	Uusi turvavaihte
Kappalekustannus	60 000 €	150 000 €	170 000 €
Kokonaiskustannus	1 200 000 €	3 000 000 €	3 400 000 €

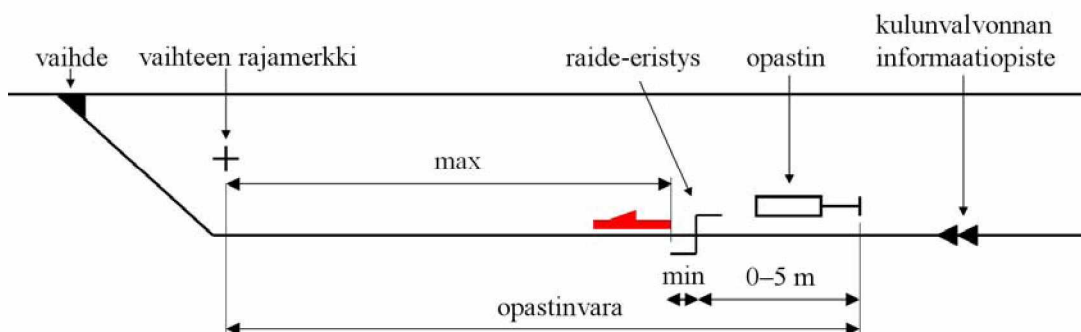
6.3 Sijoittaminen

Pysäyttävän raiteensulun sijoittaminen tulee tehdä aina tapauskohtaisesti. Pysäytysmatka on pyrittävä mitoittamaan pahimman mahdollisen tilanteen perusteella (Kappale 3.2). Kuva 47 esittää pysäyttävän raiteensulun pysäytysmatkan mitoittamisen välivaiheita. Pysäytysmatkan laskennassa otetaan huomioon raiteen pituuskaltevuus, raiteen käyttöpituus, kaluston kokonaispaino, törmäävän vaunun akselipaino ja akselipainon aiheuttama liukukitkakerroin. Liukukitkakertoimen vakiot on määritetty tehtyjen pysäytyskokeiden perusteella.



Kuva 47 Pysäytysmatkan laskennan välivaihteet

Pysäyttävä raiteensulku tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle raide-eristystä vaihteen raideosuudelle (Kuva 48). Pysäyttävää raiteensulkua ei saa asentaa raide-eristys ja opastimen väliin, koska tällöin ei voida valvoa kyseisen raideosuuden vapaanaoloa. Pysäyttävä raiteensulku saattaisi rikkoutua jos se kääntyisi kaluston ollessa sen kohdalla. Pysäytysmatka on mitoittettava vaihteen rajamerkkiin ja mitoituksessa on otettava huomioon opastimen ja raide-eristys välinen matka.

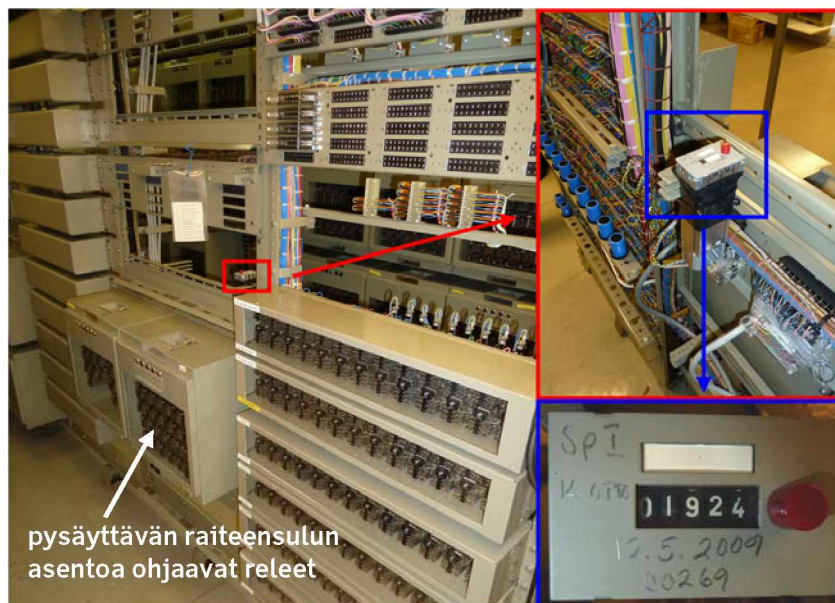


Kuva 48 Pysäyttävän raiteensulun sijoittaminen

Pysäyttävä raiteensulku tulee asentaa paikkaan, jossa se lisää turvallisuutta. Asennuspaikka tulee olla ensisijaisesti sellainen, ettei se lyhennä raiteen hyötöpituutta. Pysäyttävä raiteensulku tulee asentaa huoltotoleransseineen raiteen ja viereisen raiteen aukean tilan ulottuman ulkopuolelle.

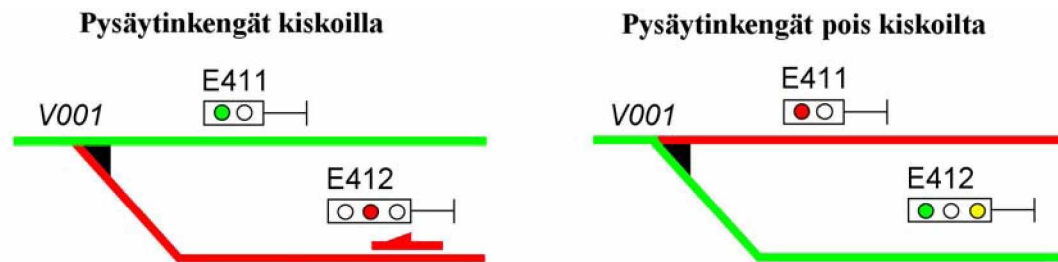
6.4 Ohjaus

Kulkutie on turvalaitejärjestelmän varmistama reitti kulkutien alku- ja päätepisteen välille. Kulkutiet varmistetaan asetinlaitejärjestelmällä. Asetinlaiteella ohjataan vaihteita, opastimia ja sivusuojia. Asetinlaitteen turvalogiikka estää risteävien kulkuteiden varmistamisen. Asetinlaitetta käytetään erilliskäytössä tai kauko-ohjatusti. Uudet asetinlaitteet ovat niin kutsuttuja tietokoneasetinlaitteita, joiden toiminta perustuu mikroprosessoritekniikkaan. Suomessa käytettäviä tietokoneasetinlaitetyyppejä on kuusi erilaista. Tietokoneasetinlaitteiden lisäksi on olemassa myös rele- ja releryhmäasetinlaitteita. [38] [2, s. 145–146] Kuva 49 esittää Riihimäen ratapihan releasetinlaitteen yhtä osaa ja koekäytössä olevan pysäyttävän raiteensulun kääntölaskuria. Kuva on otettu 8.12.2010 ja tällöin pysäytinkengät olivat kääntyneet kiskoille 1924 kertaa.



Kuva 49 Riihimäen ratapihan releasetinlaite ja pysäyttävän raiteensulun kääntölaskuri

Pysäyttävän raiteensulun toimiessa kohtausraiteella sivusuojana on sen asento riippuvainen suojattavan raiteen kulkutiestä (Kuva 50). Jos suoralle raiteelle asetetaan kulkutie, muuttuu opastimeen E411 vihreä ajon salliva väri, vaihde V001 kääntyy suoralle raiteelle, pysäytinkengät kääntyvät kiskoille ja opastin E412 muuttuu näyttämään Seis-opastetta (vasemmanpuoleinen tilanne). Jos kohtausraiteella olevalle kalustolle asetetaan kulkutie, muuttuu opastin E412 näyttämään 35 km/h nopeutta sallivaa ajoa, pysäytinkengät kääntyvät pois kiskoilta, vaihde V001 kääntyy poikkeavalle raiteelle ja opastin E411 muuttuu näyttämään Seis-opastetta (oikeanpuoleinen tilanne).



Kuva 50 Liikennepaikan turvalogiikka

Pysäyttävän raiteensulun pysäytinkengien asentoa valvotaan koskettimien avulla. Mahdollisia asentoja ovat: pysäytinkengät kiskojen välissä, pysäytinkengät kiskoilla tai vikatila. Vikatila tarkoittaa osittaista kääntymistä tai sitä, että pysäyttävään raiteensulkuun on törmännyt kalusto. Kun pysäyttävä raiteensulku on vikatilassa, laite ei voi toimia sivusuojana, eikä normaalisti laitteen suojaamaa raidetta voida asettaa kulkutiekse.

Toisin kuin kohtausraiteilla, Helsinkiin asennettavien pysäyttävien raiteensulkujen kääntö ei riipu asetettavista kulkuteistä. Kääntö tapahtuu Pasilan liikenteenohjauksesta nappia painamalla. Kummallakin pysäyttävällä raiteensululla on oma kääntönappi. Kun pysäytinkengät käännetään kiskoille, raideosuus varautuu, raiteen opastimet muuttuvat punaisiksi, eikä raiteelle voida asettaa kulkutietä. Suoritettujen kääntöjen määrää tarkkaillaan laskurilla. Helsinkiin asennettavien pysäyttävien raiteensulkujen asento nähdään myös Etelä-Suomen kauko-ohjausjärjestelmästä (ESKO), joka sijaitsee Pasilassa. ESKO-järjestelmästä ei voida ohjata pysäyttävien raiteensulkujen tilaa.

Keskitetysti ohjattu pysäyttävä raiteensulku pidetään talvisin sulana sähkövastuksien avulla. Kiskot pysyvät pysäyttävän raiteensulun kohdalla sulana kiskoihin kiinnitettyillä vastussauvoilla ja kääntölaite pysyy sulana tankokuoppalämmittimellä (Kuva 21). Sähkövastuksien tehoa ohjataan lämmitysryhmäkohtaisesti liikenteenohjauksen manuaalisilla säätökomennoilla tai automaattisten säätöjärjestelmien avulla. Vastuksien automaattinen säätö voidaan toteuttaa lumenilmaisujärjestelmällä, joka havaitsee lumen lisäksi myös rakeita, huurretta ja alijäähtynyttä vettä [63].

6.5 Kunnossapito

Pysäyttävä raiteensulku ei vaadi suuria vuosittaisia huoltoja, mutta laitteen toimintaa on tarkkailtava säännöllisesti, jotta mahdollisilta vioilta välttytään. Teknikum Oy:n mukaan kitkaelementtien käyttöikä on viisi vuotta, sillä kitkaelementin kumin ominaisuudet heikkenevät lämpötilavaihtelun ja auringon valon seurauksena. Kitkaelementit tulee varastoida alle 25 °C lämpötilassa valolta suojattuna. Kitkaelementin kumit on aktivoitava ennen käyttöä. Aktivointi tapahtuu harjaamalla kumin pinta teräs- tai messinkiharjalla. Käytössä olevan kitkaelementin kitkapinta on tarkastettava ja aktivoitava vuosittain. Jos tarkastuksessa huomataan kitkapinnassa mekaanisia vaurioita, tulee kitkaelementti vaihtaa uuteen. [64]

Siemensin valmistama kääntölaite S 700 K on luotettava ja pitkäikäinen, mutta se vaatii säännöllisiä tarkastuksia ja huoltoja. Puolen vuoden välein kääntölaitteelle on tehtävä seuraavat tarkastustoimenpiteet:

- kääntölaitteen kansi on avattava ja sisätila tarkastettava
- osien kunto tai vahingoittuminen on tarkastettava
- johdotusmoduulin kunto on tarkastettava
- kääntölaitteen rungon ja kiskon välinen maadoitusyhteys on tarkastettava.

Vuoden välein kääntölaitteelle on tehtävä seuraavat tarkastus- tai huoltotoimenpiteet:

- kammenestolaitteen ja virtalukon toiminta on tarkastettava
- kääntölaitteen kiinnittyminen on tarkastettava
- kääntötanko ja kuulamutteri on voideltava
- hammaspyörät on voideltava
- tarkistustangot on ravattava ja öljyttävä
- estoluisti ja kääntötanko on öljyttävä
- kannen lukon herkkä toimivuus on tarkastettava

Kahden vuoden välein kääntölaitteelle on tehtävä seuraavat tarkastus- tai huoltotoimenpiteet:

- väli- ja käsikamphihammaspyörän akseli on rasvattava
- kuulamutterin päässä olevat kuulalaakerit on rasvattava
- kääntötangon ja tarkistustangon ohjaimissa olevat vaseliinikammiot on täytettävä

Kääntölaite on toimitettava valmistajan tai valmistajan valtuuttaman huoltoliikkeen huoltoon kymmenen vuoden tai miljoonan käynnön välein. Pysäyttävän raiteensulun käytössä mitoittavaksi tekijäksi tulee todennäköisesti kymmenen vuotta. Laitteen keskimääräinen vikaantumisväli on noin 550 000 tuntia, joten laite on erittäin toimintavarma. [65]

Pysäyttävän raiteensulun kääntömekanismi toimitetaan rasvattuna, joten käyttöönotossa riittää irrallaan toimitettujen niveltappien rasvaus. Kääntömekanismin huoltoväli on 2000 kääntöä tai puoli vuotta. Laitetta huollettaessa tarkastetaan sen yleinen toiminta sekä lisätään rasvaa rasvanippoihin. Toimintaa tarkastettaessa on kiinnitettävä huomiota mahdollisiin välyksiin liikkeen aikana. Kääntömekanismeissa on yhteensä 11 rasvanippaa, jotka sijaitsevat neljässä eri paikassa.

- käyttökoneiston puoleisen liukukengän niveltapissa, 2 kpl
- vastapuolen niveltapissa, 1 kpl
- liukukenkien kääntöakseleiden liukulaakereissa, 4 kpl
- hammasvaihteessa, 2 kpl

Kääntömekanismi tulee huoltaa myös kitkaelementtien vaihdon yhteydessä. [66]

Pysäyttävä raiteensulku pidetään talvella sulana vaihteen lämmityssauvoilla ja tankokuoppalämmittimellä. Jos lumen tulo on runsasta, pitää laitteen toimintakuntoa ylläpitää myös harjaamalla. Loppusyksystä lehtipuualueilla on myös vaikeita olosuhteita, sillä märkien lehtien peittämän kiskon liukukitka on huomattavasti alhaisempi kuin normaaleissa oloissa. Riittävän liukukitkan takaamiseksi, lehtikelin aikaan kiskot on hyvä harjatta puhtaiksi pysäyttävän raiteensulun kohdalta.

7 Yhteenveto ja kehitysmahdollisuudet

7.1 Yhteenveto ja johtopäätökset

Pysäyttävä raiteensulku -projekti on mennyt vuosien aikana selvästi eteenpäin ja yksinkertaisesta ideasta on kehitetty toimiva turvalaite, jonka käyttöönottoa ollaan aloittamassa. Pysäyttävän raiteensulun käyttöönottoa hankaloittaa laitteen ominaisuuksien ristiriitaisuus. Pysäyttävällä raiteensululla on sekä merkittäviä etuja että haittoja nykyisiin turvalaiteratkaisuihin verrattuna.

SWOT-analyysi on laajalti käytetty nelikenttämenetelmä yritystoiminnan analysointiin. SWOT-analyysissä yrityksen/palvelun/tuotteen ominaisuudet jaetaan neljään osa-alueeseen: vahvuudet (Strengths), heikkoudet (Weaknesses), mahdollisuudet (Opportunities) ja uhat (Threats). SWOT-analyysiä käytetään arviointiin, ongelmien tunnistamiseen sekä kehittämiseen. Seuraavassa taulukossa on vedetty yhteen tässä työssä esiin nousseet pysäyttävän raiteensulun ominaisuudet SWOT-analyysin muodossa. [67]

Taulukko 19 Pysäyttävän raiteensulun SWOT-analyysi

Vahvuudet	Heikkoudet
<ul style="list-style-type: none"> • Raiteensulkuun törmäminen ei aiheuta kalustolle tai radalle vaurioita • Turvavaihdetta edullisempi alkuinvestointi • Turvavaihdetta vähäisempi ja edullisempi kunnossapito • Ei vaadi raiteen viereistä tilaa turvavaihteen tai suistavan raiteensulun tavoin 	<ul style="list-style-type: none"> • Kalustorajoitukset (ei sovellu veturien tai moottorijunien pysäyttämiseen, poikkeuksena Sm3) • Ei anna suojaa, jos kalustoa työnnetään kohti raiteensulkua • Tarvittava pysäytysmatka voi lyhentää raiteen käyttöpituutta • Pysäytysmatkan mitoittaminen hankalaa
Mahdollisuudet	Uhat
<ul style="list-style-type: none"> • Turvallisuuden lisääminen opastimilla suojatuille kohtausraiteille • Helsingin päärautatieaseman suojaaminen kaluston karkaamisilta • Vaarallisten aineiden kuljetusten suojaaminen • Ratatyöturvallisuuden parantaminen • Käsikäyttöisellä pysäyttävällä raiteensululla kysyntää yksityisraiteilla ja hiljaisimmilla liikennepaikoilla 	<ul style="list-style-type: none"> • Onnettomuusriski väärin mitoitettun pysäytysmatkan takia • Lumen ja jään vaikutus pysäytysmatkaan • Epäsopivan kaluston aiheuttaman törmäyksen seuraukset

Pysäyttävän raiteensulun avulla voidaan pysäyttää vaunu edellä vapaasti vierivä kalusto. Pysäytyskokeissa, joissa jäljiteltiin ratapihalla vierivää kalustoa, pysäytysmatkat olivat suurimmillaan joitakin kymmeniä metrejä. Tarvittava pysäytysmatka voidaan arvioida kuvassa 47 esitettyjen kaavojen avulla. Pysäytysmatkaan vaikuttavien tekijöiden vaikutukset ovat seuraavat:

- törmäysnopeuden kasvaessa pysäytysmatka kasvaa
- liikkuvan kaluston kokonaispainon kasvaessa pysäytysmatka kasvaa

- törmäävän vaunun akselipainon kasvaessa pysäytysmatka lyhenee
- liukukitkakertoimen kasvaessa pysäytysmatka lyhenee
- pysäytysmatkan alamäen jyrkentyessä pysäytysmatka kasvaa.

Pysäyttävän raiteensulun etuna on, ettei törmäämisestä aiheudu vahinkoa kalustolle tai radalle. Kustannuksiltaan keskitetysti ohjattu pysäyttävä raiteensulku on noin 35 % turvavaihteen investointikustannuksista. Pysäyttävän raiteensulun kunnossapitokustannukset ovat myös selvästi alhaisemmat kuin turvavaihteen. Lisäksi pysäyttävän raiteensulun etuna on, että se ei vaadi raiteen viereistä suistotilaa, kuten turvavaihde tai suistava raiteensulku.

Pysäyttävällä raiteensululla on kuitenkin kaksi heikkoutta, joita ei nykyisellä konstruktiolla saada vähennettyä. Ensinnäkin, pysäyttävä raiteensulku ei sovellu vetokaluston pysäyttämiseen, sillä vetureiden etuosassa olevat karja-aurat, esteenraivaajat ja hiekoituslaitteet estävät kaluston ensimmäisen pyöräkerran nousun pysäytinkien päälle. Toiseksi, pysäyttävän raiteensulun pysäytysvoima ei riitä veturin työntövoimaa vastaan. Tämän takia vaunuja työntävä veturinkuljettaja ei siis välttämättä huomaa törmänneensä raiteilla olleeseen pysäyttävään raiteensulkuun. Pysäyttävää raiteensulkua voidaan käyttää silloin, kun halutaan pysäyttää vapaasti vieriviä vaunuja.

Lumen ja jään vaikutus pysäytysmatkaan saadaan selvitettyä talvisilla pysäytyskokeilla ja näin mahdollisia uhkia saadaan vähennettyä. Kokeiden avulla myös pysäytysmatkan mitoittaminen tarkentuu. Epäsopivan kaluston aiheuttaman törmäyksen seurauksia on hankala selvittää, joten tätä uhkaa on vaikea poistaa. SWOT-taulukossa esitetyistä mahdollisuuksista kaksi ensimmäistä on toteutettavissa nykyisellä rakenteella, mutta kolme viimeistä mahdollisuutta vaativat lisää suunnittelua ja testausta.

Turvallisuus on rautatieliikenteen tärkein arvo. Tätä arvoa tulee myös noudattaa pysäyttävän raiteensulun sijoittamisessa. Pysäyttävän raiteensulun asentamista tulee harkita, jos sillä pystytään parantamaan asennuskohteen turvallisuutta.

7.2 Jatkokehitysmahdollisuudet

Yksinkertaiset kenttäkokeet osoittivat, että pysäyttävästä raiteensulusta on mahdollista kehittää vaihteen läpi liukuva versio. Vaihteen läpi liukuvassa versiossa pysäytinkengän kitkaelementti valmistetaan UNP 100 -teräsprofiilin sijaan erikylkisestä kulmateräksestä. Laitteen käyttäytymistä vaihteessa on kuitenkin kokeiltava oikealla kalustolla ennen mahdollista käyttöönottoa.

Pysäyttävän raiteensulun pysäytinkengästä on mahdollista rakentaa versio, joka olisi kaksitoiminen. Toiseen suuntaan laite olisi pysäyttävä ja toiseen suuntaan se toimisi suistavan raiteensulun tavoin. Tästä versiosta olisi esimerkiksi hyötyä Helsingissä raiteella 226 (Kuva 46).

Pysäyttävän raiteensulun kääntömekanismi on toimiva, mutta kääntömekanismin ja vaihteenkääntölaitteen kustannuksien osuus kokonaiskustannuksista on suuri. Kääntömekanismista on mahdollista tehdä edullisempi versio, joka perustuisi hydraulisiin, pneumaattisiin tai sähköisiin sylintereihin. Pysäyttävällä raiteensululla on tosin ensi oltava riittävä kysyntä, jotta kääntömekanismin uudelleen kehittelyyn kulutetut resurssit realisoituvat.

Pysäyttävän raiteensulun mahdollisten käyttöpaikkojen määrä kasvaa, jos kääntövoima tuotetaan kääntölaitteen sijasta käsin. Käsikäyttöisellä versiolla on kysyntää paikoissa, joissa liikenne on harvaa, eikä keskitetystä ohjauksesta ole hyötyä. Mahdollisia käyttökohteita ovat erilaiset kuormauspaikat. Nykyisin käytössä oleva suistava raiteensulku on pääsääntöisesti käsikäyttöinen. Pysäyttävän raiteensulun käsikäyttöinen versio on mahdollista toteuttaa samalla kääntömekanismilla kuin nykyinen suistava raiteensulku.

7.3 Lisäselvitystarpeet

Pysäyttävän raiteensulun pysäytyskokeita on tehty eri vuodenaikoina, mutta laitteen toimintaa ei ole kokeiltu hankalissa talviolioissa. Jotta pysäyttävän raiteensulun laajempaa käyttöönottoa voidaan harkita, tulee laitteen pysäytysominaisuuksia kokeilla lumisissa ja jäisissä olosuhteissa. Talvisten pysäytyskokeiden tulosten vertailu on helpointa, jos pysäytyskokeet suoritetaan samalla kalustolla samassa paikassa, kuin missä aikaisempiakin pysäytyskokeita on tehty.

Kuten kappaleen 4.1 alussa on selvitetty, kaluston monimuotoisuuden takia vierintävastuserroin on vaikea määrittää. Suorittamalla uusia vierintäkokeita, saataisiin kaluston vierintävastuskertoimelle parempi arvio ja näin tarvittavan pysäytysmatkan mitoittaminen tarkentuisi. Vierintäkokeita olisi hyvä suorittaa erilaisella kalustolla. Kaluston vierimään lähtemisen raja-arvo olisi myös hyvä todentaa kenttäkokeilla.

Pysäyttävän raiteensulun kalustoselvityksessä ei tarkasteltu ratatyökoneita. Jos tilapäiseen suojaukseen soveltuva pysäyttävä raiteensulku otetaan käyttöön, olisi laitteen soveltuvuus ratatyökoneiden pysäyttämiseen syytä selvittää. Pysäyttävän raiteensulun soveltuvuus uusien sähkömoottorijunien Sm5 (FLIRT) ja Sm6 (Allegro) pysäyttämiseen olisi myös hyvä selvittää.

Lähdeluettelo

- 1 Suomen rautatietilasto 2009. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2009. 54 s.
- 2 Hölttä, Pasi. Rautatietekniikan perusteet. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Tietekniikka, 2009. 239 s.
- 3 Kaijansinkko, Esko & Kosonen, Tero & Lehtikainen, Hannu & Lehmusto, Joni & Lähteenmäki, Jorma & Maijala, Matti & Saarinen, Mikko & Sthålborg, Kimmo & Ojanperä, Kari & Pappila, Pertti. Sivusuojatutkimus. Väliraportti osioista A & B. Oy VR Rata Ab, 2005. 29 s.
- 4 Aalto, Jukka & Hassinen, Paavo & Jamalainen, Timo & Reivinen, Mika & Salonen, Eero-Matti & Valtonen, Jarkko. Junan pysäytyskengän analyysi ja kehitystutkimus. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Rakenteiden mekaniikan laboratorio, 2005. 18 s.
- 5 Aalto, Jukka & Hassinen, Paavo & Hakala Veli-Antti. Junan pysäytyskengän analyysi ja kehitystutkimus. Pysäytinkengän kitkakertoimen arviointi. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Rakenteiden mekaniikan laboratorio, 2006. 27 s.
- 6 Aalto, Jukka & Hassinen, Paavo & Reivinen, Mika & Hakala, Veli-Antti & Valtonen, Jarkko. Junan vaunujonon pysäytinlaitteen kenttä- ja laboratorio-koekokeiden tuloksia. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Rakenteiden mekaniikan laboratorio, 2006. 28 s.
- 7 Kivioja, Seppo & Kivivuori, Seppo & Salonen, Pekka. Tribologia - kitka, kuluminen ja voitelu. 5, korjattu painos. Helsinki: Otatieto, Gaudeamus Helsinki University Press, 2007. 346 s. ISBN 978-951-672-355-9.
- 8 Aalto, Jukka & Hassinen, Paavo & Valtonen, Jarkko & Rissanen, Minna. Täyden mittakaavan pysäytyskokeet, analyysi ja johtopäätökset. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Rakenteiden mekaniikan laboratorio, 2007. 48 s.
- 9 Oranne, Arto. Rullauskokeiden tuloksia 2 promillea. 2007.
- 10 Sivonen, T. Selvitys pysäytyskengän soveltuvuudesta VR:n liikkuvalla kalustolla. VR Engineering, 2007. 10 s.
- 11 119377 d. Sm5 FLIRT Helsinki. Kokoonpanopiirustus.
- 12 Aalto, Jukka & Valtonen, Jarkko & Jamalainen, Timo & Rissanen, Minna. Pysäytyskengän tarvittavan korkeuden teoreettinen ja kokeellinen arviointi sekä valuntakokeiden tulosten tarkastelu. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Rakenteiden mekaniikan laboratorio, 2007. 20 s.
- 13 Valtonen, Jarkko & Hölttä, Pasi. Tutkimuslaskelma - Junanpysäytyskengän kenttäkokeet 17.9.2008, Tampere, Lielähti. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Yhdyskunta ja tietekniikanlaitos, Tietekniikka, 2008. 4 s.

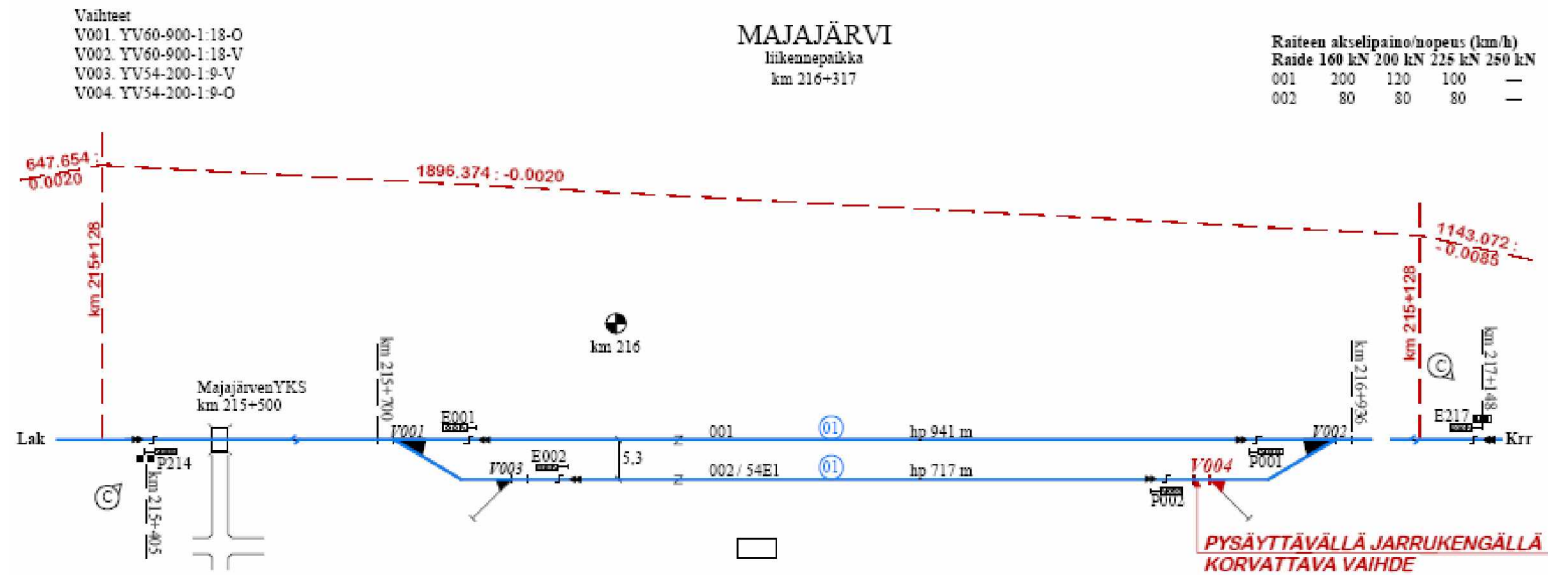
- 14 Mekaaniset ominaisuudet. Ferrometal Oy. [www]. [Viitattu 31.8.2010].
Saatavissa: <http://www.ferrometal.fi/tuotteet/tuotetietoa.html>
- 15 Ratatekniset ohjeet. Osa 2: Radan geometria. Helsinki: Liikennevirasto, 2010. 86 s. ISBN 978-952-255-505-2.
- 16 Loppi, Aarre. Pysäyttävän raiteensulun kehitystyön tilanne. Teoksessa: Saaarinen, Hannu. Rautatietekniikka 1/2010. Helsinki: Rautatiealan Teknisten Liitto RTL ry, 2010. 60 s. ISSN 1237-1513.
- 17 Ratatekniset määräykset ja ohjeet. Osa 11: Radan päällysrakenne. Dnro 921/731/02. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2002. 114 s.
- 18 Tiilikainen, Teuvo. Vanhempi konsultti. E54-kiskon jännitystarkastelu. Pölkkyväli on 800 mm ja 600 mm, sekä akselikuorma 250 kN. Helsinki: VR-Rata Oy, 2009.
- 19 Loppi, Aarre. Johtaja. Oy VR-Rata Ab, Sähköasennuskeskus, Turkvalaiteryhmä SAKE. Hyvinkään sähköasennuskeskus, Halli 6, Kerkkolankatu 32, 05800 Hyvinkää. Haastattelu, 2.12.2010.
- 20 Aarre, Loppi. Pysäyttävä raiteensulku. Rata 2010 seminaari.
- 21 Maijala, Matti. Johtava asiantuntija. Oy VR-Rata Ab, Rautatiesuunnittelu, Rataryhmä. VR pääkonttori, Vilhonkatu 13, 00100 Helsinki. Haastattelu 17.6.2010.
- 22 Onnettomuustutkintakeskus. B1/2010R Henkilövaunujen törmäminen raidepuskimeen ja edelleen toimistorakennuksen seinään Helsingin asemalla 4.1.2010. Helsinki, 2010.
- 23 Maijala, Matti. Pysäyttävän raiteensulun lisätestaukset ja Helsingin aseman raiteiden 012–019 betoniesteiden korotusmahdollisuudet. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2010. 12 s.
- 24 Pysäyttävän raiteensulun kustannusvertailu, Majajärvi. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2010. 9 s.
- 25 Sivusuojan riskianalyysi. Helsinki: Liikennevirasto, 2010. 24 s.
- 26 Tavaravaunun suistuminen kiskoilta ja vaihtotyönjohtajan loukkaantuminen vaihtotyössä Tuupovaarassa 31.12.2005. Tutkintaselostus C9/2005R. Helsinki: Onnettomuustutkintakeskus, 2005. 29 s.
- 27 Loppi, Aarre. Rautatiekaluston pysäyttäminen hallitusti poikkeusoloissa. Teoksessa: Saarinen, Hannu. Rautatietekniikka 1/2008. Helsinki: Rautatiealan Teknisten Liitto RTL ry, 2008. 60 s. ISSN 1237-1513.
- 28 Huerlimann, Daniel & Nash, Andrew B. Opentrack, Simulation of Railway Networks, Version 1.6. 152 s.

- 29 Hibbler, Russel Charles. Engineering Mechanics - Dynamics. 12th ed. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Pearson Education Inc, 2010. 732 s. ISBN-10: 0-13-607791-9.
- 30 Esveld, Conraad. Modern Railway Track. 2nd ed. Delft University of Technology, 2001. 654 s. ISBN 90-800324-3-3.
- 31 Profillidis, Vassiolios A. Railway management and engineering. Third edition. USA, Burlington: Ashgate Publishing Company, 2006. ISBN 978-0-7546-4854-3. 469 s.
- 32 Aalto, Jukka & Hassinen, Paavo & Valtonen, Jarkko ... Täyden mittakaavan pysäytyskokeet, analyysi ja johtopäätökset. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Rakenteiden mekaniikan laboratorio, 2007. 48 s.
- 33 Teknikum Material Handling, TRL20, Rubber Compound for Mill Linings. Teknikum, 2005.
- 34 Persson, Bo N. J. Sliding Friction - Physical Principles and Applications. Second Edition. German, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. 460 s. ISBN 3-540-63296-4.
- 35 Ojanperä, Kari. RAMO 7 Perustelumuistio. Järvenpää: Peverk Oy, 2006. 62 s.
- 36 Tavaravaunujen suurimmasta sallitusta kuormasta, junapainosta ja junan kokoonpanosta. RVI/725/412/2008. Helsinki: Rautatievirasto, 2008. 14 s.
- 37 Peltola, Martta. Tavarajunien mäkeenjääntien estäminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampere. 2010. 115 s.
- 38 Ratatekniset ohjeet. Osa 6: Turvalaitteet. Dnro 2961/041/2009. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2009. 203 s.
- 39 Ratatekniset määräykset ja ohjeet. Osa 7: Rautatieliikennepaikat. O 4/2006. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2006. 98 s.
- 40 Junaturvallisuussääntöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet. Kymmenes muutettu painos. Helsinki: Rautatievirasto, 2008. 102 s.
- 41 Leivo, Jarno. Suunnittelija. Oy VR-Rata Ab, Rautatiesuunnittelu, Turvalaiteryhmä. VR pääkonttori, Vilhonkatu 13, 00100 Helsinki. Sähköposti-haastattelu, 20.7.2010.
- 42 Nummelin, Markku. Rautatievaihteet - kehitys, rakenne ja kunnossapito. Helsinki: VR-Pääkonttori, ratayksikkö, 1994. 144 s. ISBN 951-47-8649-1.
- 43 Vaihteenlämmityksen tekniset määreet. Ratahallintokeskuksen julkaisuja B17. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2006. 105 s. ISBN 952-445-163-8.

- 44 Ratainvestointien hankearvointiohje. Ratahallintokeskuksen julkaisu B12. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2004. 60 s.
- 45 Liikkuvan kaluston tekniset määräykset ja ohjeet. 1437/734/06. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2006.
- 46 Rata tekniset määräykset ja ohjeet. Osa 4: Vaihteet. 154/731/00. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2000. 79 s.
- 47 Rata tekniset ohjeet. Osa 17: Radan merkit. Dnro 542/041/2009. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2009. 117 s.
- 48 Alumiiniseokset. Valuatlas. [www]. [Viitattu 12.10.2010]. Saatavissa: www.valuatlas.fi/tietomat/docs/metals_aluminum_FI.pdf
- 49 Pulkki, Juha. Suunnittelija. Konepaja Mankinen Oy. Tehtaankatu 9, 11711 Riihimäki. Sähköpostihaastattelu 3.1.2011.
- 50 Airila. Koneen osien suunnittelu. 5. painos. Helsinki: WSOY, 2010. 796 s. ISBN 978-9-5102-0172-5.
- 51 Rata tekniset ohjeet. Osa 10: Junien kulunvalvonta JKV. Dnro 2535/041/2009. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2009. 133 s.
- 52 Tavaraliikenteen ratapihavisio ja -strategia 2025. A 1/2004. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2004. 78 s. ISBN 952-445-094-1.
- 53 Iikkanen, Pekka & Mukula, Mikko & Kosonen, Tero & Kiuru, Tiina. Raakapuun terminaali- ja kuormauspaikkaverkon kehittäminen. A 4/2009. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2009. 71 s. ISBN 978-952-445-278-6.
- 54 Yksityisraiteet. Liikennevirasto. [www]. [Viitattu 10.9.2010]. Saatavissa: <http://www.rhk.fi/rataverkko/yksityisraiteet/>
- 55 Hannula, Ari. Turvallisuusneuvonantaja. VR-Yhtymä Oy, Logistiikka, VR Cargo. VR pääkonttori, Vilhonkatu 13, 00100 Helsinki. Sähköpostihaastattelu, 1.11.2010.
- 56 C6/2007R Typpihappokuormassa olleen säiliövaunun kaatuminen Siilinjärvellä 4.8.2007. Onnettomuustutkintakeskus. [www]. [Viitattu 22.9.2010]. Saatavissa: <http://www.onnettomuustutkinta.fi/Etusivu/Tutkintaselostukset/Raideliikenne/Raideliikenne2007/1215524448242>
- 57 Pertti, Hult. Projektipäällikkö. Oy VR-Rata Ab, Sähköasennuskeskus, Turvalaite-ryhmä SAKE. Hyvinkään sähköasennuskeskus, Halli 6, Kerkkolankatu 32, 05800 Hyvinkää. Sähköpostihaastattelu 15.11.2010.
- 58 Radanpidon turvallisuusohjeet. Ratahallintokeskuksen julkaisu B 24. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2009. 92 s. ISBN 978-952-445-287-8.

- 59 Rata tekniset määräykset ja ohjeet. Osa 4: Vaihteet. 154/731/00. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2009. 79 s.
- 60 Friman, Jori. Projektipäällikkö. Oy VR-Rata Ab, Sähköasennuskeskus, Turvalaiteryhmä SAKE. Hyvinkään sähköasennuskeskus, Halli 1, Kerkkolankatu 32, 05800 Hyvinkää. Sähköpostihaastattelu 15.11.2010.
- 61 Mäkelä, Tommi. Perussolmutapiohjen merkitys ja näkymät osana kuljetusjärjestelmää. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 5/2008. Helsinki: Ratahallintokeskus, 2008. 71 s. ISBN 978-952-445-223-6.
- 62 Hietaranta, Juhani. Tavarajunan törmäminen Helsingin asemaan 5.10.1990. [www]. [Viitattu 14.9.2010]. Saatavissa: <http://www.seisake.net/onnettomuus.php>
- 63 Lumenilmaisujärjestelmä. Peverk Oy. 1996.
- 64 Tiensuu, Pentti. Teknikum Oy. Vammalan tehdas, Nokiankatu 1, 38211 Sastamala. Sähköpostihaastattelu 29.9.2010.
- 65 S 700 K Electric Point Machine. Operating Manual. Siemens, 1997. 34 s.
- 66 Pulkki, Juha. Suunnittelija. Konepaja Mankinen Oy. Tehtaankatu 9, 11711 Riihimäki. Sähköpostihaastattelu 30.9.2010.
- 67 SWOT analyysi. Qualitas Forum. [www]. [Viitattu 3.12.2010]. Saatavissa: <http://www.qualitas-forum.fi/Laaduntyökalut/SWOTanalyysi/tabid/132/Default.aspx>

Kustannusvertailu

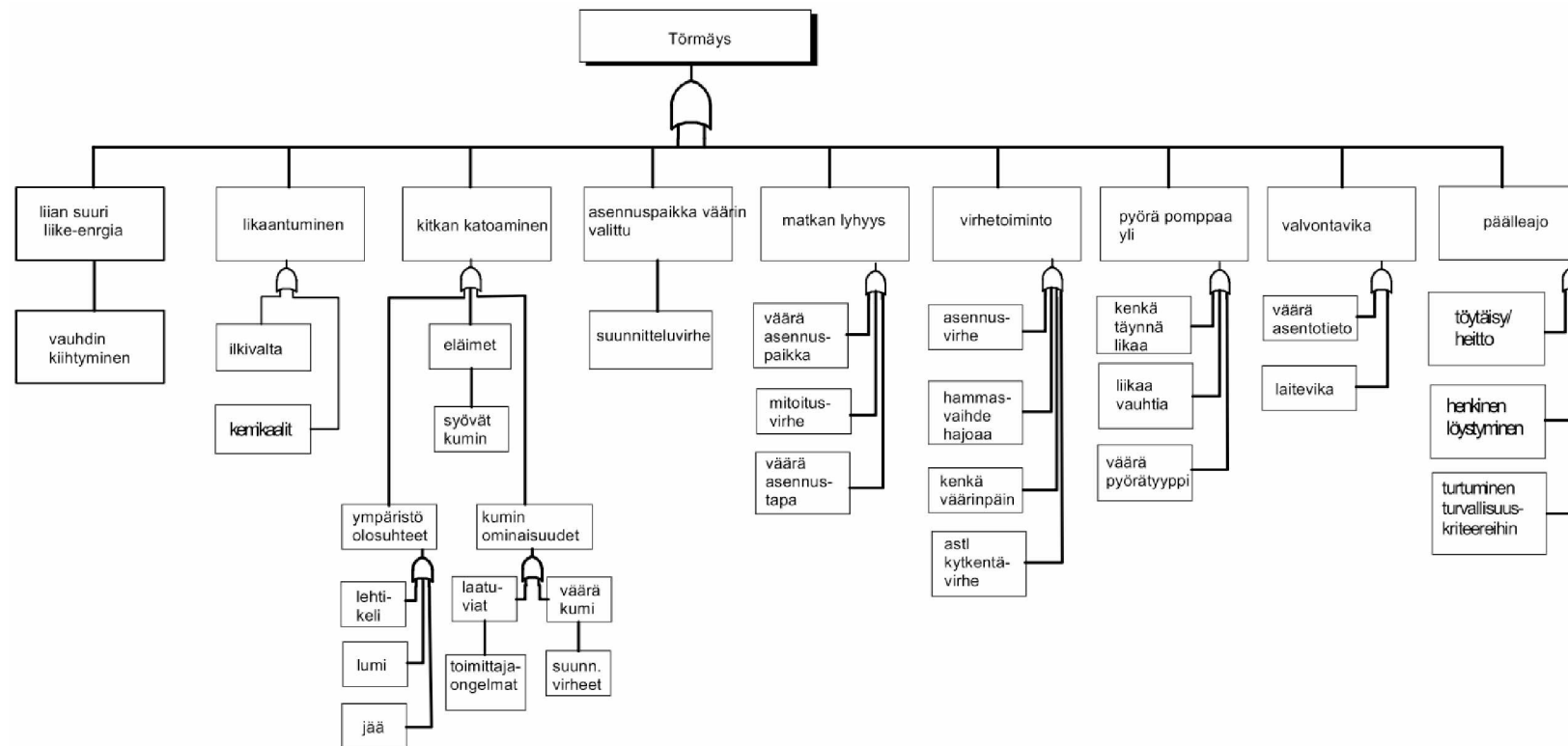


Kuva 1 Majajärven raiteistokaavio [24]

Taulukko 1 Kustannusarvio turvavaihteen paikalle asennettavasta pysäyttävästä raiteensulusta [24]

Osa / tehtävä	Määrä	Yks.	Yks. hinta	Hinta (€)
Pysäyttävä raiteensulku				31 798
vulkanoitu pysäytinkenkä	2	kpl	1 670,00	3 340
hammastankomallinen kääntömekanismi	1	kpl	16 615,00	16 615
suojaukset				750
standardiauraussuojien muutos	3	kpl	333,33	1 000
vaihteenkääntölaite Siemens S700K	1	kpl	8 092,86	8 093
välitangot eristyksineen				2 000
Maa- pohja ja kalliorakenteet				1 903
Tukikerroksen poistaminen	90	m ³	9,27	834
Raiteen purku	30	m	35,63	1 069
Päällys- ja pintarakenteet				15 382
tukikerroksen asentaminen	75	m ³	13,87	1 040
tukikerros, materiaalikustannus	75	m ³	8,08	606
uuden raiteen asennustyö	30	m	35,29	1 059
jatkuvakiskoraiteen kiskot	30	m	104,89	3 147
uudet betonipölkyt	30	m	125,11	3 753
kiskon katkaisu	1	erä	400,00	400
vaihteen poisto	1	kpl	4 977,16	4 977
raidepuskimen purku	1	kpl	400,00	400
Työmaatehtävät				5 630
rakentamisen johtotehtävät				864
urakoitsijan yritystehtävät				1 901
rakentamisen työmaatehtävät				346
työmaapalvelut				346
työmaan kalusto				173
turvalaite- ja vahvavirtatyöt				2 000
Tilajatehtävät				3 143
suunnittelutehtävät				1 569
rakennuttamis- ja omistajatehtävät				1 574
Yhteensä				57 856 €

Riskianalyysi



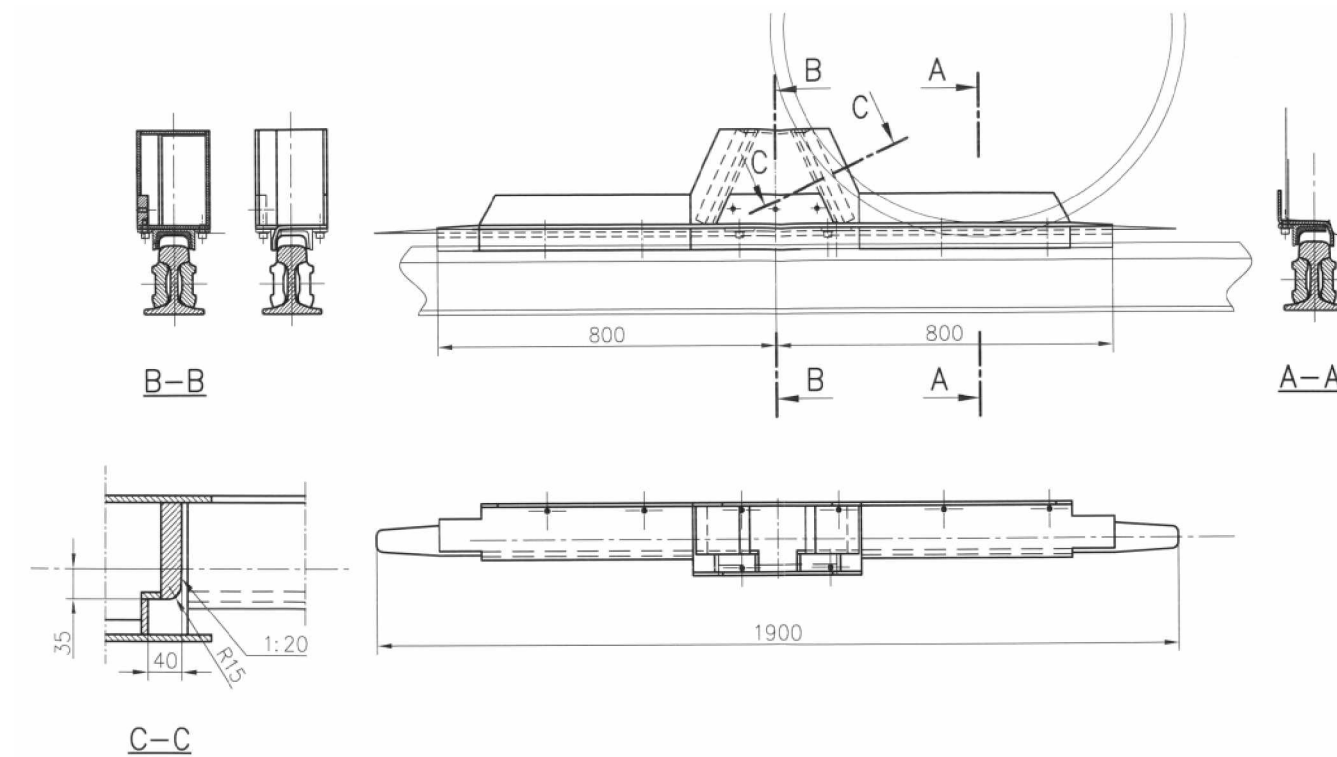
Kuva 1

Pysäyttävän raiteensulun vikapuu [25]

Taulukko 1 Riskienarvioinnin tulos ja turvallisuussuunnitelma [25]

Riski tai ongelma	Riskin syy	Pahimmat seuraukset	T	H	R	L	Toimenpiteet, suunnitelmat
kiihtyminen/hidastuminen	liian suuri liike-energia	törmäys	3	5	15	A	laitteiden sijoitusrajoitukset on määriteltävä turvallisesti
liukupinnan likaantuminen	ilkivalta, kemikaalit	törmäys	3	4	12	B	kunnossapito-ohjeet on täsmennettävä
lumi	sää	törmäys	5	5	25	A	selvitettävä huollettavuus ja sään vaikutus varmistettava lisätestein
lehtikeli	sää	kitkan katoaminen	3	4	12	B	kunnossapito-ohjeet on tarkastettava
lämpötila	aurinko, kitka, vaihteenlämmitys	kumi haurastuu	3	3	9	B	kunnossapito-ohjeet ja kumin ominaisuudet selvitetävä
kalusto lähtee liikkeelle itsestään	tuuli	törmäys	2	4	8	B	suunnittelumitotukset määritettävä. kaluston kiinnipysyminen on jo vaatimus.
asennuspaikka väärin valittu	suunnitteluvirhe	törmäys	2	4	8	B	suunnittelu- ja asennusohjeet tarkastettava
jarrutusmatka ei riitä	mitoitusvirheet, väärä asennus	törmäys	2	5	10	B	suunnittelu- ja asennusohjeet tarkastettava
junan nopeus liian suuri	inhimilliset tekijät, sää	jarrutusmatka ei riitä	2	5	10	B	maksiminopeus on testattava
virheellinen toiminto tai kenkä väärinpäin	asennusvirhe	toiminta häiriintyy, törmäys	2	4	8	B	asennusohjeet tarkastettava. kaksipuolinen kenkä käyttöön.
tärinä, pulttien irtoaminen	lukitsemattomat ruuvit	kengän irtoaminen	2	3	6	B	mekaaniset rakenteet tarkastettava
kumi vanhenee	UV, ympäristötekijät	jarrutuskyky heikkenee	3	3	9	B	materiaalitutkimus, kunnossapitotiheys
vaihteenlämmitys tuhoaa jarrukumin	suunnitteluvirhe	jarrutuskyky heikkenee	3	3	9	B	lämmityksen vaikutukset kumiin selvitetävä
aurausriski	huolimattomuus, näkyvyyseste	laite ja aura särkyvät	3	2	6	B	havaittavuus täytyy huomioida
kaluston soveltamattomuus pysäyttävään jarrukenkään	erityyppinen kalusto	kaluston särkyminen, jarrukengän hajoami-nen, riittämätön jarrutus	3	4	12	B	YTE-hyväksytty kalusto täytyy soveltua käytettäväksi
laite ei toimi	toimintakertojen lukumäärä ylitetty	laitteen toimimattomuus	3	2	6	B	selvitetään käyttökerrat/huoltoväli

Kaksisuuntaisen pysäytinkengän kokoonpanopiirustus, Konepaja Mankinen Oy



Pysäytyskokeiden tulokset

Taulukossa 2 on esitetty pysäyttävän raiteensulun pysäytyskokeiden tulokset. Pysäytyskokeet on listattu ja numeroitu kronologisesti. Liikennepaikka-sarakkeessa merkintä Llh tarkoittaa Tampereen Lielahtea, merkintä Msä tarkoittaa Valkeakosken Metsäkansaa ja merkintä Mn tarkoittaa Porin Mäntyluotoa. Aika-sarakkeeseen on merkitty pysäytyskokeen suoritusajankohta muodossa kuukausi/vuosi. Pysäytyskalusto-sarake kertoo käytettyjen veturien ja vaunujen määrän sekä tyyppin. Viimeisenä on ilmoitettu pysäyttävään raiteensulkuun törmäävän vaunun tyyppi. Vaunun tyyppin perässä oleva merkintä K tarkoittaa, että vaunu on kuormattu. Taulukossa 1 on esitetty pysäytyskokeissa käytettyjen törmäävien vaunujen tiedot. Näitä tietoja käytetään akselipainon korjauskertoimen laskemiseen (Kaava 11).

Taulukko 1 Laskentaan tarvittavia kaluston mittoja

Kalusto	Taara (t)	Pituus (m)	Akseliväli (m)	Akselipaino (kN)	Massakeskipisteen korkeus (m)
Dv12	68	14,0	-	-	-
Elo-t	14,5	14,5	9,0	72,5	1,0
Hkb	12,5	14,0	8,6	62,5	0,9
Hkb, K	12,5	14,0	8,6	190,0	1,4
Tabkk	31,2	21,0	15,0	78,0	1,1
BOppy, K	-	15,0	12,0	100,0	1,2

Akselipaino-sarake kertoo pysäyttävän raiteensulun päälle nousseen akselin aiheuttaman voiman. Kaltevuus-sarake kertoo koepaikan raiteen pituuskaltevuuden. Raiteiden pituuskaltevuudet on selvitetty nopeuskaaviosta. Kaikki pysäytyskokeet suoritettiin laskevan pituuskaltevuuden suuntaan. Kokeiden törmäysnopeudet on mitattu gps-paikannukseen perustuvalla vbox-laitteella. Pysäytyskokeiden pysäytysmatkat mitattiin mittapyörällä. Ilmankosteus- ja lämpötilatiedot on selvitetty Ilmatieteenlaitoksen tilastoista.

Taulukkoon 3 on laskettu pysäytyskokeiden tulosten perusteella erilaisia tunnuslukuja. Tulokset on numeroitu ja eroteltu samalla tavalla taulukon 2 kanssa. Pysäytyksen keskimääräinen liukukitkakerroin ja akselipainon korjauskerroin on laskettu kaavojen 1 ja 14 avulla iteroimalla. Iterointia suoritettiin 1000 kierrosta tai kunnes tulosten muutos oli pienempi kuin 0,001. Kaluston kriittinen pituuskaltevuus on laskettu kaavalla 17. Kaluston pysäytysenergia saadaan kaavan 3 avulla. Vierintävastuksen osuus -sarake kertoo vierintävastuksen (vierintävastuskerroin 0,0015) prosentuaalisen osuuden liikettä vastustavista voimista. Raiteensulun osuus -sarake kertoo pysäyttävän raiteensulun kitkavoiman prosentuaalisen osuuden liikettä vastustavista voimista.

Taulukko 2 Pysäytyskokeiden tulokset

Koe	Liikennepaikka	Aika	Pysäytyskalusto	Akselipaino (kN)	Kokonaispaino (t)	Kaltevuus (‰)	Nopeus (km/h)	Pysäytysmatka (m)	Ilmankosteus (%)	Lämpötila (C°)
1	Llh	4/06	2xDv12+Hkb,K	190	174,0	1,25	3,0	0,5	88	1,8
2	Llh	4/06	2xDv12+Hkb,K	190	174,0	1,25	5,1	1,8	88	1,8
3	Llh	4/06	2xDv12+Hkb,K	190	174,0	1,25	12,3	9,2	88	1,8
4	Llh	4/06	2xDv12+Hkb,K	190	174,0	1,25	3,0	0,3	88	1,8
5	Llh	4/06	2xDv12+Hkb,K	190	174,0	1,25	4,7	1,3	88	1,8
6	Llh	4/06	2xDv12+Hkb,K	190	174,0	1,25	9,3	6,2	88	1,8
7	Llh	4/06	2xDv12+Hkb,K	190	174,0	1,25	10,3	9,3	88	1,8
8	Llh	4/06	2xDv12+Hkb,K	190	174,0	1,25	12,9	12,7	86	2,1
9	Llh	4/06	2xDv12+Hkb,K	190	174,0	1,25	9,9	6,1	86	2,1
10	Llh	4/06	2xDv12+Hkb,K	190	174,0	1,25	9,6	5,3	86	2,1
11	Llh	6/06	Dv12+Hkb	62,5	80,5	1,25	5,2	0,9	55	13,6
12	Llh	6/06	Dv12+Hkb	62,5	80,5	1,25	7,6	2,5	55	13,6
13	Llh	6/06	Dv12+Hkb	62,5	80,5	1,25	10,1	3,9	55	13,6
14	Llh	6/06	Dv12+Hkb	62,5	80,5	1,25	10,7	4,8	55	13,6
15	Llh	6/06	Dv12+Hkb	62,5	80,5	1,25	12,5	7,0	61	13,9
16	Llh	6/06	Dv12+Hkb	62,5	80,5	1,25	5,0	0,9	61	13,9
17	Llh	6/06	Dv12+Hkb	62,5	80,5	1,25	7,7	2,4	61	13,9
18	Llh	6/06	Dv12+Hkb	62,5	80,5	1,25	10,0	4,4	61	13,9
19	Msä	10/06	2xDv12+9xBOPpy,K+Hkb	62,5	517,0	1,00	2,3	1,6	56	11,0
20	Msä	10/06	2xDv12+9xBOPpy,K+Hkb	62,5	517,0	1,00	5,3	7,8	54	12,0
21	Msä	10/06	2xDv12+9xBOPpy,K+Hkb	62,5	517,0	1,00	6,5	12,0	50	12,0
22	Msä	10/06	2xDv12+9xBOPpy,K+Hkb	62,5	517,0	1,00	9,0	24,5	56	12,0
23	Msä	10/06	2xDv12+9xBOPpy,K+Hkb	62,5	517,0	1,00	10,5	34,7	57	12,0
24	Msä	10/06	2xDv12+30xBOPpy,K+Hkb	62,5	1378,0	1,00	3,1	4,6	60	8,0
25	Msä	10/06	2xDv12+30xBOPpy,K+Hkb	62,5	1378,0	1,00	5,5	26,0	62	8,0
26	Msä	10/06	2xDv12+30xBOPpy,K+Hkb	62,5	1378,0	1,00	8,2	66,2	65	7,0
27	Msä	10/06	2xDv12+30xBOPpy,K	100	1366,0	1,00	3,2	5,0	60	8,0
28	Msä	10/06	2xDv12+30xBOPpy,K	100	1366,0	1,00	6,8	19,2	59	8,0
29	Msä	10/06	2xDv12+30xBOPpy,K	100	1366,0	1,00	9,5	50,1	58	9,0
30	Mn	5/10	Dv12+4xTabkk+Elo-t	72,5	207,3	6,80	15,0	35,4	80	8,7
31	Mn	5/10	Dv12+4xTabkk+Elo-t	72,5	207,3	6,80	20,0	64,2	70	9,0
32	Mn	5/10	Dv12+4xTabkk+Elo-t	72,5	207,3	6,80	25,0	97,1	70	9,0
33	Mn	5/10	Dv12+4xTabkk+Elo-t	72,5	207,3	6,80	30,0	134,0	65	10,0
34	Mn	5/10	Dv12+4xTabkk+Elo-t	72,5	207,3	6,80	35,0	218,9	70	10,0
35	Mn	5/10	Dv12+8xTabkk+Elo-t	72,5	332,1	6,80	20,0	87,0	75	10,0
36	Mn	5/10	Dv12+8xTabkk+Elo-t	72,5	332,1	6,80	35,0	328,7	80	9,0
37	Mn	5/10	Dv12+8xTabkk	78,0	317,6	6,80	20,0	72,9	85	9,0
38	Mn	5/10	Dv12+8xTabkk	78,0	317,6	6,80	34,0	239,0	90	8,0
39	Mn	5/10	Dv12+8xTabkk	78,0	317,6	6,80	35,0	241,5	90	8,0

Taulukko 3 Pysäytyskokeiden tuloksista laskettuja tunnuslukuja

Koe	Liukukitkakerroin	Akselipainon korjauskerroin	Kriittinen pituus- kaltevuus (-‰)	Pysäytysenergia (MJ)	Vierintävastuksen osuus (%)	Pysäytinkenkien osuus (%)
1	0,60	1,07	70,5	0,06	2,1	97,9
2	0,49	1,06	56,6	0,18	2,6	97,4
3	0,55	1,07	64,4	1,04	2,3	97,7
4	0,96	1,12	117,7	0,06	1,3	98,7
5	0,57	1,07	66,6	0,15	2,2	97,8
6	0,47	1,06	54,6	0,59	2,7	97,3
7	0,39	1,05	44,6	0,73	3,3	96,7
8	0,45	1,05	51,3	1,14	2,8	97,2
9	0,54	1,07	62,9	0,67	2,3	97,7
10	0,58	1,07	68,1	0,63	2,2	97,8
11	1,27	1,19	117,9	0,08	1,3	98,7
12	1,02	1,14	90,6	0,18	1,6	98,4
13	1,13	1,16	102,6	0,32	1,4	98,6
14	1,05	1,15	93,6	0,36	1,6	98,4
15	0,99	1,14	87,5	0,49	1,7	98,3
16	1,19	1,17	109,0	0,08	1,4	98,6
17	1,08	1,15	96,9	0,19	1,5	98,5
18	1,00	1,14	89,1	0,31	1,7	98,3
19	0,92	1,13	12,5	0,11	10,7	89,3
20	0,99	1,14	13,7	0,60	9,9	90,1
21	0,97	1,14	13,3	0,90	10,1	89,9
22	0,92	1,13	12,5	1,74	10,7	89,3
23	0,88	1,13	12,0	2,38	11,1	88,9
24	1,41	1,24	7,7	0,57	16,3	83,7
25	0,81	1,14	4,1	1,96	26,9	73,1
26	0,70	1,12	3,5	4,47	30,0	70,0
27	0,95	1,10	7,6	0,61	16,6	83,4
28	1,11	1,12	9,0	2,69	14,3	85,7
29	0,83	1,09	6,6	5,43	18,6	81,4
30	0,79	1,10	30,3	2,29	4,7	95,3
31	0,77	1,10	29,8	4,09	4,8	95,2
32	0,79	1,10	30,6	6,34	4,7	95,3
33	0,82	1,11	31,7	9,05	4,5	95,5
34	0,71	1,09	27,3	12,82	5,2	94,8
35	0,95	1,13	23,4	7,05	6,0	94,0
36	0,82	1,11	20,0	22,98	7,0	93,0
37	1,02	1,08	26,9	6,45	5,3	94,7
38	0,93	1,07	24,3	19,23	5,8	94,2
39	0,96	1,07	25,2	20,12	5,6	94,4

Taulukko 4 Kaavan 13 avulla optimoidut liukukitkakertoimet.

Liukukitkakertoimien erotusten neliösumman minimi on 0,9507. Tällöin kaavan materiaali-vakiot saavat arvot $K=231,5$ ja $n_k=0,5062$.

Koe	μ	$F_N(N)$	μ_0	$\Delta\mu$
1	0,60	186390	0,58	0,02
2	0,49	186390	0,58	-0,09
3	0,55	186390	0,58	-0,03
4	0,96	186390	0,58	0,38
5	0,57	186390	0,58	-0,01
6	0,47	186390	0,58	-0,11
7	0,39	186390	0,58	-0,19
8	0,45	186390	0,58	-0,13
9	0,54	186390	0,58	-0,04
10	0,58	186390	0,58	0,00
11	1,27	61312	1,00	0,27
12	1,02	61312	1,00	0,02
13	1,13	61312	1,00	0,13
14	1,05	61312	1,00	0,04
15	0,99	61312	1,00	-0,01
16	1,19	61312	1,00	0,19
17	1,08	61312	1,00	0,08
18	1,00	61312	1,00	0,00
19	0,92	61312	1,00	-0,08
20	0,99	61312	1,00	-0,01
21	0,97	61312	1,00	-0,03
22	0,92	61312	1,00	-0,08
23	0,88	61312	1,00	-0,12
24	1,41	61312	1,00	0,40
25	0,81	61312	1,00	-0,19
26	0,70	61312	1,00	-0,30
27	0,95	98100	0,79	0,15
28	1,11	98100	0,79	0,31
29	0,83	98100	0,79	0,04
30	0,79	71122	0,93	-0,14
31	0,77	71122	0,93	-0,16
32	0,79	71122	0,93	-0,14
33	0,82	71122	0,93	-0,11
34	0,71	71122	0,93	-0,22
35	0,95	71122	0,93	0,02
36	0,82	71122	0,93	-0,11
37	1,02	76518	0,90	0,12
38	0,93	76518	0,90	0,03
39	0,96	76518	0,90	0,06

μ on keskimääräinen liukukitkakerroin

F_N on törmäävän vaunun akselivoima

μ_0 on optimoitu liukukitkakerroin

$\Delta\mu$ on liukukitkakertoimien erotus

Liukukitkakertoimen kaava 13 on sovitettu pienimmän neliösumman menetelmällä pysäytyskokeiden keskimääräisiin liukukitkakertoimiin. Sovitus on tehty Microsoft Office Excelin Ratkaisija-apuohjelmalla.

Taulukko 5 Kaavan 1 avulla optimoidut liukukitkakertoimet.

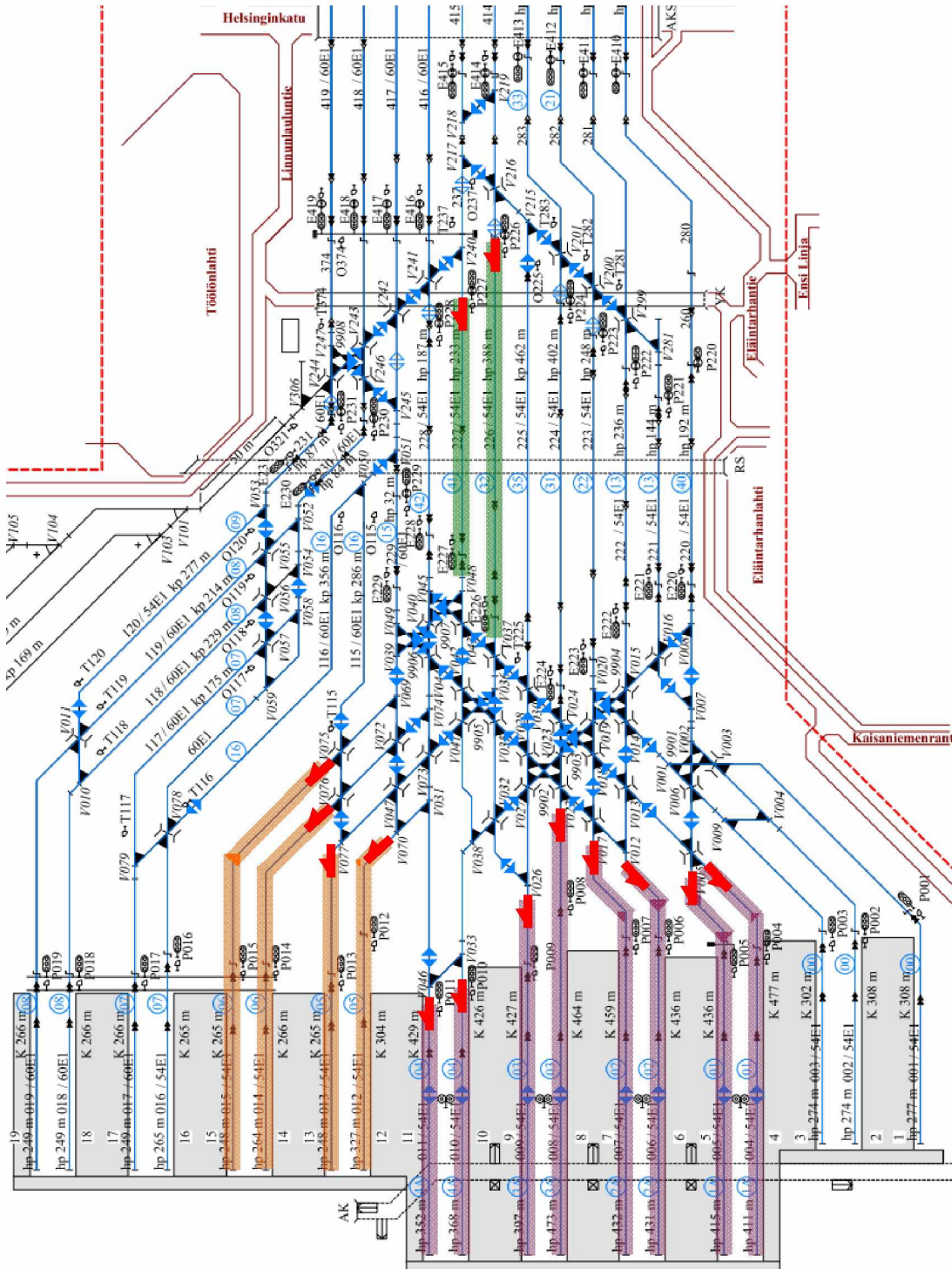
Liukukitkakertoimien erotusten neliösumman minimi on 0,9434. Tällöin kaavan materiaali-vakiot saavat arvot $A=0,6401$ ja $B=0,0095$.



Koe	μ	p (kN/m)	μ_0	$\Delta\mu$
1	0,60	124,26	0,57	-0,03
2	0,49	124,26	0,57	0,08
3	0,55	124,26	0,57	0,02
4	0,96	124,26	0,57	-0,39
5	0,57	124,26	0,57	0,00
6	0,47	124,26	0,57	0,10
7	0,39	124,26	0,57	0,18
8	0,45	124,26	0,57	0,13
9	0,54	124,26	0,57	0,03
10	0,58	124,26	0,57	-0,01
11	1,27	40,88	0,99	-0,28
12	1,02	40,88	0,99	-0,02
13	1,13	40,88	0,99	-0,14
14	1,05	40,88	0,99	-0,05
15	0,99	40,88	0,99	0,01
16	1,19	40,88	0,99	-0,20
17	1,08	40,88	0,99	-0,08
18	1,00	40,88	0,99	-0,01
19	0,92	38,32	0,99	0,08
20	0,99	38,32	0,99	0,00
21	0,97	38,32	0,99	0,02
22	0,92	38,32	0,99	0,08
23	0,88	38,32	0,99	0,11
24	1,41	38,32	0,99	-0,41
25	0,81	38,32	0,99	0,19
26	0,70	38,32	0,99	0,29
27	0,95	61,31	0,82	-0,13
28	1,11	61,31	0,82	-0,29
29	0,83	61,31	0,82	-0,02
30	0,79	44,45	0,94	0,15
31	0,77	44,45	0,94	0,17
32	0,79	44,45	0,94	0,15
33	0,82	44,45	0,94	0,12
34	0,71	44,45	0,94	0,23
35	0,95	44,45	0,94	-0,01
36	0,82	44,45	0,94	0,11
37	1,02	47,82	0,91	-0,10
38	0,93	47,82	0,91	-0,01
39	0,96	47,82	0,91	-0,05



μ on keskimääräinen liukukitkakerroin
 p on törmäävän vaunun akselivoima metriä kohden
 μ_0 on optimoitu liukukitkakerroin
 $\Delta\mu$ on liukukitkakertoimien erotus

Liukukitkakertoimen kaava 1 on sovitettu pienimmän neliösumman menetelmällä pysäytyskokeiden keskimääräisiin liukukitkakertoimiin. Sovitus on tehty Microsoft Office Excelin Ratkaisija-apuohjelmalla.

Helsingin raiteistokaavio sekä suunnitellut pysäyttävän raiteensulun asennuspaikat



Kuvassa  on pysäyttävä raiteen sulkua,  on vaihtoehtojen 1 pysäytysmatkat,

 on vaihtoehtojen 2 pysäytysmatkat ja  on vaihtoehtojen 3 pysäytysmatkat

